



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**Penentuan *Critical Clearing Time* (CCT) untuk Analisis Kestabilan Transien pada Sistem Kelistrikan 150kV Sumatera Utara Tahun 2025**

Nur Ichsan Boni  
NRP 2215 105 027

Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017



**FINAL PROJECT - TE 141599**

**Critical Clearing Time (CCT) for Transient Stability  
Analysis on 150kV Electrical Systems North Sumatra  
2025**

Nur Ichsan Boni  
NRP 2215 105 027

Counsellor Lecturer  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT  
Faculty of Electrical Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2017

## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Penentuan *Critical Clearing Time* (CCT) untuk Analisis Kestabilan Transien pada Sistem Kelistrikan 150kV Sumatera Utara Tahun 2025”** adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017

Nur Ichsan Boni  
2215 105 027

**PENENTUAN *CRITICAL CLEARING TIME* (CCT) UNTUK  
ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN PADA SISTEM  
KELISTRIKAN 150KV SUMATERA UTARA TAHUN 2025**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**



Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D.  
NIP. 194907151974121001

**Dosen Pembimbing II**



Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.  
NIP. 197309271998031004



# **Penentuan *Critical Clearing Time* (CCT) untuk Analisis Kestabilan Transien pada Sistem Kelistrikan 150kV Sumatera Utara Tahun 2025**

Nama : Nur Ichsan Boni  
NRP : 2215105027  
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Dosen Pembimbing 2 : Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng

## **ABSTRAK**

Perusahaan Listrik Negara (PLN) terus melakukan pengembangan sistem kelistrikan untuk memenuhi kebutuhan beban di Indonesia. Salah satu upaya dalam pengembangannya adalah pengembangan sistem kelistrikan Sumatera Utara. Menurut RUPTL Tahun 2025, wilayah Sumatera Utara akan menambah pembangkit berkapasitas 1052 MW diikuti dengan penambahan beban 2360 MVA. Pengembangan sistem kelistrikan ini dapat meningkatkan terjadinya gangguan, seperti gangguan hubung singkat yang menyebabkan pemutusan saluran secara tiba-tiba melalui rele pengaman dan *circuit breaker* (CB). Hal ini dapat membuat suatu sistem mengalami perubahan struktural dan mengakibatkan ketidakstabilan. Namun terkadang kemampuan rele pengaman untuk mendeteksi gangguan memerlukan waktu yang lebih lama dari *Critical Clearing Time* (CCT). *Circuit breaker* ini harus dapat memutuskan saluran dan gangguan dalam waktu yang singkat, yakni kurang dari waktu pemutus kritisnya, atau biasa disebut *critical clearing time*. Oleh karena itu, diperlukan suatu analisa sistem tenaga listrik untuk menentukan “*Critical Clearing Time*” (CCT). Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa CCT pada titik yang dicoba berada dibawah waktu pembukaan CB, yaitu 0.3 s.

**Kata Kunci** : *Critical Clearing Time*, RUPTL, Sumatera Utara, Kestabilan Transien

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# ***Critical Clearing Time (CCT) for Transient Stability Analysis on 150kV Electrical Systems North Sumatra 2025***

Name : Nur Ichsan Boni  
NRP : 2215105027  
Counsellor Lecturer 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Counsellor Lecturer 2 : Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng

## ***ABSTRACT***

*State Electricity Company (PLN) continues to develop electrical systems to meet the needs of the load in Indonesia. One of the efforts in the development is the development of North Sumatra electricity system. According to RUPTL Year 2025, the northern region of Sumatra will add to the 1052 MW power plant followed by the addition of 2360 MVA load. The development of this electrical system may increase the occurrence of interference, such as short-circuit interference that causes abrupt disconnection through the safety and circuit breaker (CB). This can make a system undergo a structural change and lead to instability. Sometimes, however, the ability of the safety relay to detect the interference takes longer than Critical Clearing Time (CCT). This circuit breaker should be able to break the channel and interruption in a short time, ie less than the critical breaker time, or commonly called critical clearing time. Therefore, a power system analysis is required to determine "Critical Clearing Time" (CCT). The results of the simulation show that the CCT at the point tried are below the time of opening of the CB, ie 0.3 s.*

***Keywords:*** *Critical Clearing Time, RUPTL, North Sumatra, Transient Stability*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya sehingga saya selaku penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul :

### **Penentuan *Critical Clearing Time* (CCT) untuk Analisis Kestabilan Transien pada Sistem Kelistrikan 150kV Sumatera Utara Tahun 2025**

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini dapat menambah ilmu dan wawasan bagi para pembaca dalam melakukan studi kasus mengenai analisa stabilitas transien di industri. Di samping itu perlu juga adanya studi lebih lanjut mengenai implementasi di kemudian hari.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran demi penyempurnaan di masa yang akan datang.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## UCAPAN TERIMA KASIH

Atas selesainya penyusunan Tugas Akhir ini, saya sebagai penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. ALLAH SWT yang tanpaNya penulis tidak mungkin bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Kedua Orang tua saya yang selalu memberikan doa dan semangat untuk selalu mengingatkan saya menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang selaku dosen pembimbing pertama yang bersedia memberikan plan untuk saya memberikan bimbingan ketika terjadi masalah ketika pengerjaan, yang selalu memberikan bimbingan pada saya setiap minggu untuk progres pengerjaan Tugas Akhir sehingga Tugas Akhir ini dapat selesai
4. Bapak Ardyono Priyadi selaku dosen pembimbing kedua yang selalu memberikan bimbingan yang telah banyak memberikan masukan tentang buku TA sehingga dapat selesai tepat pada waktunya.
5. Teman-teman LJ 2015 khususnya yang mengambil transient stability dan plant Sumatera Utara prof seno mas gilang, imam tantowi, anizar, fajar, oki, wisnu, singgih, tyar yang selalu yang selalu memberikan info-info pembimbing dan selalu memberikan support ketika proses pengerjaan TA.
6. Teman-teman kos koala : Andry, Riko yang selalu memberikan semangat.
7. Semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan Tugas Akhir yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
8. Febri Trian Pangesti selaku pendamping yang selalu menyemangati pengerjaan TA

Dan semua pihak yang telah membantu saya selama perkuliahan dan dalam pengerjaan TA.

Besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi pembaca. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik. Terima kasih.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

*(Halaman ini sengaja dikosongkan.)*

# DAFTAR ISI

	HALAMAN
<b>JUDUL</b>	
<b>LEMBAR PERNYATAAN</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>UCAPAN TERIMA KASIH</b> .....	vii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ix
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiii

## BAB 1 PENDAHULUAN

1.1	Latar Belakang .....	1
1.2	Permasalahan dan Batasan Masalah .....	2
1.3	Tujuan .....	2
1.4	Metode Penelitian .....	2
1.5	Sistematika Pembahasan .....	3
1.6	Relevansi .....	4

## BAB 2 DASAR TEORI

2.1	Definisi Kestabilan .....	5
2.2	Kestabilan Sistem Tenaga Listrik .....	5
	2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor .....	7
	2.2.2 Kestabilan Tegangan .....	12
	2.2.3 Kestabilan Frekuensi .....	12
2.3	Kestabilan Transien .....	13
	2.3.1 Kestabilan Transien Multimesin .....	15
2.4	Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan .....	16
2.5	Hal-Hal yang Mempengaruhi Kestabilan .....	19
	2.6.1 Gangguan Hubung Singkat .....	19
	2.6.2 Starting Motor .....	19
	2.6.3 Penambahan Beban Secara Tiba-Tiba .....	20
2.6	<i>Critical Clearing Time</i> .....	20

### **BAB 3 DATA DAN METODOLOGI**

3.1	Data Kelistrikan Sumatera Utara .....	23
3.2	Data Kontroller Generator .....	31
3.3	Metodologi Simulasi .....	32

### **BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS**

4.1	Pemodelan Sistem Kelistrikan Sumatera Utara .....	37
4.2	Metode <i>Time Domain Simulation</i> .....	37
4.3	Simulasi <i>Critical Clearing Time</i> .....	44
4.4	Hasil <i>Critical Clearing Time</i> .....	48

### **BAB 5 PENUTUP**

5.1.	Kesimpulan.....	51
5.2.	Saran .....	51

### **DAFTAR PUSTAKA .....**

### **LAMPIRAN (*SINGLE LINE DIAGRAM*)**

### **BIODATA PENULIS**

# TABLE OF CONTENTS

	PAGE
<b>TITLE</b>	
<b>STATEMENT SHEET</b>	
<b>CERTIFICATION SHEET</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>FOREWORD</b> .....	v
<b>ACKNOWLEDGEMENTS</b> .....	vii
<b>TABLE OF CONTENTS</b> .....	ix
<b>LIST OF FIGURES</b> .....	xi
<b>LIST OF TABLES</b> .....	xiii
 <b>CHAPTER 1 PREFACE</b>	
1.1 Background .....	1
1.2 Problems and Limitations .....	2
1.3 Objectives .....	2
1.4 Research Methods .....	2
1.5 Systematic Discussion .....	3
1.6 Relevance .....	4
 <b>CHAPTER 2 BASIC THEORY</b>	
2.1 Definition of Stability .....	5
2.2 Stability of Electric Power System .....	5
2.2.1 Stability of Angle Rotor .....	7
2.2.2 Voltage Stability .....	12
2.2.3 Frequency Stability .....	12
2.3 Transient Stability .....	13
2.3.1 Transient Stability of Multimachine .....	15
2.4 Rotor Dynamics and Swing Equations .....	16
2.5 Things That Affect Stability .....	19
2.6.1 Short Circuit Fault .....	19
2.6.2 Motor Starting .....	19
2.6.3 Sudden Load Additions .....	20
2.6 Critical Clearing Time .....	20
 <b>CHAPTER 3 DATA AND METHODOLOGY</b>	
3.1 Data of North Sumatera Electricity .....	23

3.2 Generator Controller Data ..... 31

3.3 Simulation Methodology ..... 32

**CHAPTER 4 SIMULATION DAN ANALYSIS**

4.1 North Sumatra Electrical System Modeling..... 37

4.2 Time Domain Simulation Method ..... 37

4.3 Critical Clearing Time Simulation ..... 44

4.4 Critical Clearng Time Results ..... 48

**CHAPTER 5 CLOSING**

5.1. Conclusion..... 51

5.2. Recommendation ..... 51

**REFERENCES** ..... 53

**ENCLOSURE (SINGLE LINE DIAGRAM)**

**BIOGRAPHY**



## DAFTAR GAMBAR

	HALAMAN
Gambar 2.1	Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga.....6
Gambar 2.2	Single Line Diagram Sistem Dua Mesin .....8
Gambar 2.3	Diagram Impedansi Sistem Dua Mesin.....8
Gambar 2.4	Diagram Phasor Sistem Dua Mesin .....9
Gambar 2.5	Diagram Skema untuk Studi Kestabilan.....10
Gambar 2.6	Ilustrasi Kestabilan Transien .....14
Gambar 2.7	Representasi Rotor Generator dengan Arah Rotasi dari Torsi Mekanik dan Torsi Elektrik. ....16
Gambar 2.8	Efek Waktu Pemutusan Gangguan .....21
Gambar 2.9	Kurva Ayunan .....22
Gambar 3.1	<i>Flowchart</i> Metodologi .....33
Gambar 4.1	Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Labuhan Angin dan Sibolga (2025 – <i>Peak Load</i> ) .....37
Gambar 4.2	Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Labuhan Angin dan Sibolga (2025 – <i>Normal Load</i> ) .....38
Gambar 4.3	Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Titi Kuning dan Sei Rotan (2025 – <i>Peak Load</i> ) .....39
Gambar 4.4	Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Titi Kuning dan Sei Rotan (2025 – <i>Normal Load</i> ) .....40
Gambar 4.5	Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Salak dan Sidikalang (2025 – <i>Peak Load</i> ) .....41
Gambar 4.6	Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Salak dan Sidikalang (2025 – <i>Normal Load</i> ) .....42
Gambar 4.7	Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Sorik Merapi dan Penyabungan (2025 – <i>Peak Load</i> ) .....43

Gambar 4.8	Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Sorik Merapi dan Penyabungan (2025 – Normal Load) .....	44
Gambar 4.9	Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Sibundong dan Tarutung (2025 – Peak Load).....	45
Gambar 4.10	Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Sibundong dan Tarutung (2025 – Normal Load).....	46

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1	Data Saluran Transmisi Sumatera Utara 2025 .....23
Tabel 3.2	Daftar Pembangkit Sumatera Utara 2025 .....28
Tabel 3.3	Daftar Beban Sumatera Utara 2025.....30
Tabel 3.4	Pemodelan Dinamis Untuk Unit Generator pada Sistem Sumatera Utara 150 kV .....32
Tabel 4.1	<i>Summary of Total Generation and Demand</i> .....35
Tabel 4.2	Hasil CCT Saluran Menuju Pembangkit.....47

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dengan meningkatnya pemanfaatan tenaga listrik pada rumah tangga, industri, dan lain lain, maka kebutuhan energi listrik semakin meningkat. Oleh karena itu pasokan listrik harus ditambah, yakni dengan pembangunan pembangkit listrik baru.

Dalam hal ini Perusahaan Listrik Negara (PLN) terus melakukan pengembangan sistem kelistrikan untuk memenuhi kebutuhan beban di Indonesia yang tertuang dalam RUPTL. Sistem tenaga listrik terdiri dari beberapa pembangkit dengan kapasitas unit-unit pembangkit yang relatif besar dan terletak cukup berjauhan satu dengan yang lainnya. Sehingga sistem harus dijaga kestabilannya berdasarkan parameter kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi, dan kestabilan tegangan.

Stabilitas adalah kemampuan dari generator untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan sistem. Keadaan sinkron merupakan keadaan dimana selisih daya mekanik dan daya elektrik dari generator sama dengan nol. Ketika adanya pelepasan beban maupun adanya penambahan beban, selisih antara daya mekanik dan daya elektrik telah berubah. Hal ini menyebabkan adanya percepatan atau perlambatan rotor. Maka sudut rotor akan berubah, jika tidak segera diatasi akan menyebabkan adanya *loss sinkron* pada generator.[1]

Akibat adanya perubahan kondisi kerja dari sistem ini, maka keadaan sistem akan berubah dari keadaan lama ke keadaan baru. Periode singkat di antara kedua keadaan tersebut disebut periode paralihan atau *transient*. Stabilitas *transient* didasarkan pada kondisi kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dengan periode waktu penyelidikan pada detik pertama terjadinya gangguan. Ketika ayunan pertama terjadi, keadaan kontrol (*governor*) masih belum bekerja, sehingga daya mekanik diasumsikan konstan. Oleh karena itu, diperlukan suatu analisa sistem tenaga listrik untuk menentukan kestabilan sistem tersebut pada saat terjadi gangguan, yaitu dengan menentukan “*Critical Clearing Time*” (CCT).

Salah satu upaya dalam pengembangan sistem kelistrikan di Indonesia adalah pengembangan sistem kelistrikan Sumatera Utara. Sehingga penulis membuat tugas akhir dengan judul Penentuan CCT

(*Critical Clearing Time*) untuk Analisis Kestabilan Transien pada Sistem Kelistrikan 150kV Sumatera Utara

## **1.2 Permasalahan dan Batasan Masalah**

Permasalahan dan batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Merancang sistem kelistrikan 150 kV Sumatera Utara Tahun 2025
2. Gangguan tiga fasa ke tanah dekat dengan bus pembangkit
3. Menentukan besarnya nilai *Critical Clearing Time* (CCT) sistem kelistrikan 150 kV Sumatera Utara Tahun 2025

## **1.3 Tujuan**

Penelitian Tugas Akhir ini bertujuan untuk :

1. Memperoleh besarnya nilai *Critical Clearing Time* (CCT) yang akurat
2. Mengetahui batas maksimum *Setting Circuit Breaker* pada sistem kelistrikan Sumatera Utara
3. Mencegah Generator pada sistem Kelistrikan Sumatera Utara mengalami lepas sinkron

## **1.4 Metode Penelitian**

Metodologi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pengumpulan Data  
Pengumpulan data-data sistem kelistrikan Sumatera Utara Menurut RIPTL tahun 2025.

2. Pemodelan Sistem

Setelah semua data sistem kelistrikan didapatkan, maka dilakukan pemodelan sistem dalam bentuk single line diagram dan sekaligus memasukkan data yang diperoleh pada single line diagram agar dapat dicari nilai *Critical Clearing Time* (CCT).

3. Simulasi dan analisis kestabilan transien

Penentuan CCT untuk analisis kestabilan transien dilakukan dengan menggunakan software ETAP untuk mengetahui respon dari sudut rotor. Respon sudut rotor pada sistem dapat digunakan sebagai acuan untuk mendapatkan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) yang akurat.

#### 4. Studi Kasus

Studi kasus dilakukan dengan mencari CCT di dekat bus pembangkit di sistem kelistrikan Sumatera Utara Tahun 2025.

#### 5. Penentuan *Critical Clearing Time* (CCT)

Penentuan *Critical Clearing Time* (CCT) dilakukan dengan menentukan waktu pemutusan circuit breaker pada sistem. Setelah itu, penentuan *Critical Clearing Time* (CCT) dilanjutkan dengan mengamati respon sudut rotor. *Critical Clearing Time* (CCT) ditemukan berdasarkan waktu respon sudut rotor yang stabil dan tidak stabil.

#### 6. Penarikan Kesimpulan

Memberikan kesimpulan mengenai CCT (*Critical Clearing Time*) yang didapatkan pada Sistem Kelistrikan 150kV Sumatera Utara Tahun 2025 serta memberikan rekomendasi untuk menentukan setting waktu maksimal *Circuit Breaker* (CB) pada sistem kelistrikan Sumatera Utara Tahun 2025.

### 1.5 Sistematika Pembahasan

Sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

#### BAB I : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, dan sistematika pembahasan

#### BAB II : Dasar Teori

Bab ini secara garis besar membahas stabilitas transien, persamaan ayunan, dan *Critical Clearing Time*

#### BAB III : Sistem Kelistrikan Sumatera Utara 150 kV.

Bab ini membahas sistem kelistrikan transmisi, pembangkitan generator, impedansi saluran, spesifikasi beban 150kV dan software stabilitas transien ETAP 12.6.

#### BAB IV : Simulasi dan Analisa

Bab ini membahas tentang simulasi dan *Critical Clearing Time*. Simulasi menggunakan ETAP 12.6. Selanjutnya dilakukan analisa tentang *Critical Clearing Time* yang telah didapatkan. Dari hasil simulasi diperhatikan respon sudut rotor sebelum, saat dan setelah terjadi gangguan.

#### BAB V : Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah diperoleh.

## **1.6 Relevansi**

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat dan dapat dijadikan referensi pada penelitian selanjutnya tentang *Critical Clearing Time* sistem kelistrikan Sumatera Utara



## **BAB 2**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 Definisi Kestabilan**

Stabilitas sistem tenaga adalah kemampuan sistem untuk kembali ke kondisi operasi normal atau stabil setelah mengalami gangguan. Sebaliknya, ketidakstabilan berarti suatu kondisi yang mengakibatkan sistem hilang sinkronisasi. Kestabilan adalah fenomena dimana sistem tenaga cenderung untuk mengatasi gangguan agar keadaan seimbang tercapai. Suatu sistem dikatakan tetap stabil (tetap sinkron), jika kekuatannya cenderung mempertahankan mesin dalam keadaan sinkron dengan mesin lainnya. Umumnya analisa stabilitas dilakukan pada tingkat perencanaan saat pembangkit dan transmisi baru dibuat. Studi ini diperlukan dalam menentukan sistem pengaman relay, waktu pemutusan kritis, sudut pemutusan kritis, kestabilan tegangan dan kemampuan suplai daya antar sistem. Bila sistem tidak stabil, mesin akan kehilangan sinkronisasi dan tidak akan lagi bekerja pada kecepatan sinkron. Hal ini akan menyebabkan daya, tegangan dan arus mengalami osilasi yang berlanjut pada kerusakan beban yang menerima suplai listrik dari sistem tidak stabil.

Akhir-akhir ini, sistem tenaga listrik menjadi lebih kompleks akibat meningkatnya permintaan beban. Hal ini diikuti dengan meningkatnya resiko gangguan yang berpengaruh pada stabilitas sistem. Oleh karena itu, sangatlah penting untuk menganalisa stabilitas sistem tenaga. Hal ini diperlukan untuk menghindari kerugian finansial yang besar.

#### **2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik**

Kestabilan sistem tenaga adalah kemampuan sistem untuk tetap dalam keadaan seimbang saat terjadi gangguan, atau dapat kembali ke keadaan normal setelah terjadi gangguan [2].

Terdapat beberapa gangguan pada sistem tenaga listrik yang dapat mempengaruhi kestabilan :

a. Gangguan kecil

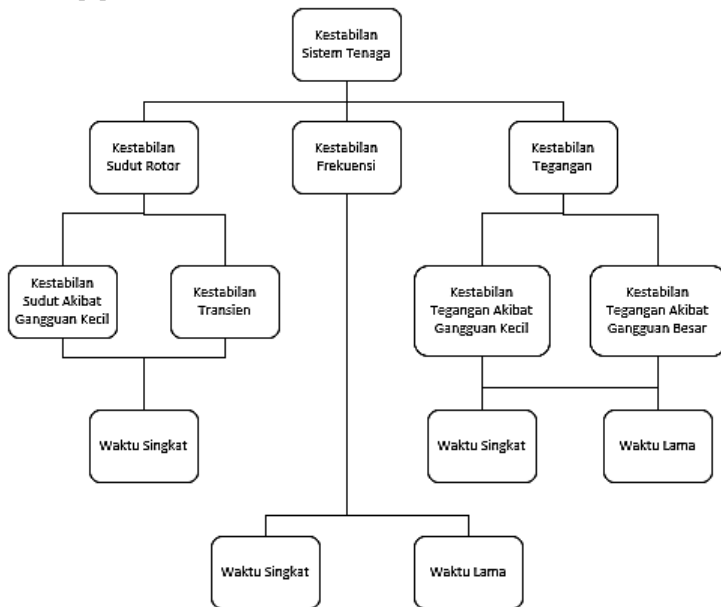
Gangguan kecil adalah gangguan yang terjadi akibat perubahan beban atau transfer daya pembangkit yang terjadi secara acak, pelan dan bertingkat. Fenomena trip pada tenaga listrik dianggap sebagai

gangguan kecil jika pengaruhnya terhadap aliran daya sebelum gangguan pada aliran itu tidak signifikan [3].

b. Gangguan besar

Gangguan besar menimbulkan lonjakan tegangan tiba tiba pada tegangan bus. Gangguan ini bersifat mendadak. Oleh karena itu gangguan ini harus secepatnya dihilangkan. Gangguan besar sangat mempengaruhi kestabilan sistem. Terlebih jika gangguan tersebut berlangsung lama. Hal ini sangat mengganggu kinerja sistem tenaga [3].

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi tiga macam kategori, yaitu: stabilitas sudut rotor, stabilitas frekuensi dan stabilitas tegangan. Stabilitas sudut rotor adalah kemampuan dari generator untuk tetap sinkron satu sama lain. Stabilitas frekuensi yaitu kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi frekuensi sebelum, saat, dan setelah terjadi gangguan. Sedangkan stabilitas tegangan yaitu kestabilan dari sistem tenaga listrik untuk dapat mempertahankan nilai tegangan pada kondisi steady state maupun transien [4].



**Gambar 2.1** Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga [4]

### 2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan masing-masing generator sinkron yang terhubung dalam suatu sistem tenaga listrik untuk tetap dalam keadaan sinkron. Permasalahan kestabilan ini melibatkan pembahasan tentang osilasi elektromekanis pada suatu sistem tenaga [2].

Lebih jelasnya kestabilan sudut rotor dibagi menjadi 2 sub kategori yaitu :

- *Small-disturbance* (gangguan kecil) *rotor angle stability* [4]

Yaitu kemampuan dari sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi terhadap gangguan kecil. Gangguan ini bergantung pada keadaan awal operasi sistem. Ketidakstabilan pada gangguan kecil ini timbul karena 2 hal yaitu

- i) Peningkatan sudut rotor pada mode non osilasi dan tidak periodic karena kurangnya torsi sinkronisasi.
- ii) Osilasi sudut rotor meningkat karena kurangnya torsi redaman yang cukup.

- *Large-disturbance* (gangguan besar) *rotor angle stability* [4]

Gangguan ini dikategorikan sebagai *transient stability*. Yaitu kemampuan dari sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi ketika mengalami gangguan yang besar. Gangguan itu biasanya adalah hubung singkat pada saluran transmisi. Respon sudut rotor generator ini dipengaruhi oleh adanya hubungan sudut daya.

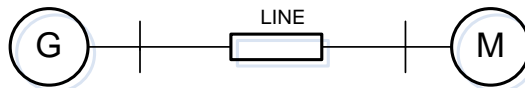
Kestabilan transien bergantung pada kondisi awal sistem operasi dan tingkat besarnya gangguan yang terjadi. Ketidakstabilan sudut rotor akan menghasilkan sudut baru karena torsi sinkronisasi tidak cukup. Sehingga mewujudkan ketidakstabilan pada ayunan pertama ketika terjadi gangguan. Tetapi dalam sistem tenaga listrik yang besar ketidakstabilan tidak selalu terjadi pada ayunan pertama, melainkan dapat terjadi melebihi ayunan pertama. Hal ini diakibatkan oleh hasil dari superposisi dari mode ayunan interarea yang lambat.

Perubahan torsi elektromekanik pada mesin sinkron yang mengalami gangguan dapat dibagi menjadi dua komponen :

- Komponen torsi sinkron, pada fasa dengan penyimpangan sudut rotor
- Komponen torsi peredam (*Damping torque*), pada fasa dengan penyimpangan kecepatan.

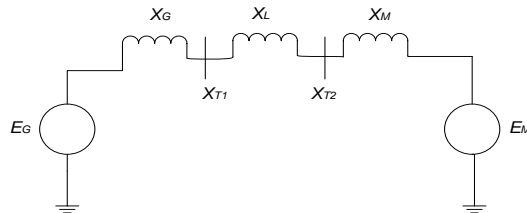
Kestabilan mesin sinkron bergantung pada kedua komponen torsi tersebut untuk masing-masing mesin sinkron. Kurangnya torsi sinkron akan menghasilkan ketidak stabilan tanpa osilasi, sebaliknya kekurangan torsi peredam akan menghasilkan ketidakstabilan yang disertai dengan osilasi [2].

Karakteristik yang paling penting dalam kestabilan tenaga listrik adalah karakteristik hubungan daya dengan posisi rotor pada mesin sinkron.



**Gambar 2.2** Single Line Diagram Sistem Dua Mesin [2]

Pada Gambar 2.2. tersebut mengilustrasikan dua buah mesin sinkron dimana keduanya saling terhubung melalui sebuah saluran transmisi yang memiliki reaktansi. Reaktansi saluran transmisi yang diperhitungkan pada kasus ini hanyalah nilai reaktansi induktif  $X_L$  sedangkan untuk resistansi dan kapasitansi saluran diabaikan karena nilainya relative kecil. Generator sinkron yang mesuplai daya diwakili oleh mesin  $G$  sedangkan motor sinkron diwakili oleh mesin  $M$ . Single line pada Gambar 2.2. di atas dapat diubah menjadi diagram impedansi seperti Gambar 2.3. di bawah:



**Gambar 2.3** Diagram Impedasi Sistem Dua Mesin [2]

dimana:

$E_G$  = Tegangan internal generator.

$E_M$  = Tegangan internal motor.

$X_G$  = Reaktansi internal generator.

$X_M$  = Reaktansi internal motor.

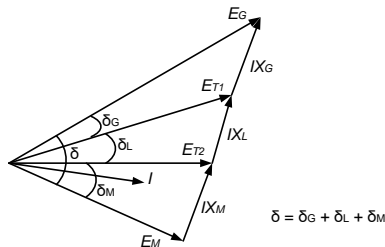
$X_T$  = Reaktansi saluran.

Daya generator yang digunakan untuk mesuplai motor merupakan

fungsi pembeda sudut  $\delta$  antara rotor kedua mesin. Perbedaan sudut  $\delta$  tersebut timbul akibat adanya ketiga komponen yaitu sudut internal generator, perbedaan sudut antara tegangan pada generator dan motor, sudut internal motor.

Sudut internal generator  $\delta_G$  adalah sudut dimana rotor generator yang mendahului medan putar pada stator.  $\delta_L$  adalah sudut dimana tegangan generator mendahului tegangan motor. Sudut dimana rotor tertinggal oleh medan putar pada stator motor dinamakan sudut internal motor  $\delta_M$ .

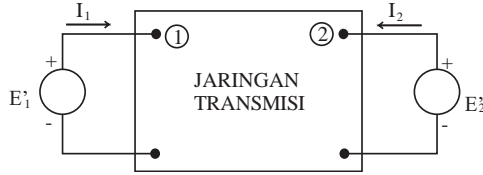
Dari ketiga komponen diatas, diagram fasor yang menunjukkan bagaimana bentuk hubungan antara tegangan internal motor  $E_M$  dan dengan tegangan internal generator  $E_G$  dapat dilihat pada gambar dibawah:



**Gambar 2.4** Diagram Phasor Sistem Dua Mesin [2]

Dari Gambar 2.4 di atas dapat diperoleh suatu persamaan yang menyatakan hubungan daya generator yang ditransfer ke motor dalam fungsi sudut [2].

Untuk mempermudah mencari persamaan sudut daya, maka Gambar 2.3. akan dirubah menjadi sebuah skema sederhana yang biasa digunakan untuk studi kestabilan. Dimana tegangan peralihan generator dimisalkan sebagai  $E'_1$  dan tegangan motor dimisalkan sebagai  $E'_2$ . Sedangkan reaktansi generator, jaringan transmisi serta reaktansi motor dijadikan satu dan dimasukkan ke dalam sebuah kotak, sehingga tampak seperti Gambar 2.5 berikut :



**Gambar 2.5** Diagram Skema untuk Studi Kestabilan [5]

Dari Gambar 2.5 diatas bisa didapatkan:

$$Y_{rel} = \begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{vmatrix} \quad (2.1)$$

Persamaan umum aliran daya adalah sebagai berikut berikut ini:

$$P_k - jQ_k = V_k^* \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \quad (2.2)$$

Kemudian dengan membuat nilai  $k$  dan  $N$  berturut-turut sama dengan 1 dan 2, serta mengganti variabel  $V$  dengan  $E'_2$  maka dapat memperoleh persamaan:

$$P_1 + Q_1 = E'_1 (Y_{11} E'_1)^* + E'_1 (Y_{12} E'_2)^* \quad (2.3)$$

Jika didefinisikan:

$$E'_1 = |E'_1| \angle \delta_1 \quad E'_2 = |E'_2| \angle \delta_2 \quad (2.4)$$

$$Y_{11} = G_{11} + jB_{11} \quad Y_{12} = |Y_{12}| \angle \delta_{12} \quad (2.5)$$

Akan didapatkan:

$$P_1 = |E'_1|^2 G_{11} + |E'_1| |E'_2| |Y_{11}| \cos(\delta_1 - \delta_2 - \delta_{12}) \quad (2.6)$$

$$Q_1 = -|E'_1|^2 B_{11} + |E'_1| |E'_2| |Y_{11}| \sin(\delta_1 - \delta_2 - \delta_{12}) \quad (2.7)$$

Persamaan juga berlaku untuk rel 2 dengan saling menukarkan *subscript* pada kedua persamaan tersebut.

Jika kita misalkan :

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 \quad (2.8)$$

dan menetapkan sudut baru  $\gamma$  sedemikian rupa sehingga

$$\gamma = \theta_{12} - \frac{\pi}{2} \quad (2.9)$$

jika dimasukkan pada persamaan 2.6, maka akan diperoleh:

$$P_1 = |E'_1|^2 G_{11} + |E'_1||E'_2||Y_{11}| \sin(\delta - \gamma) \quad (2.10)$$

Persamaan di atas dapat juga dituliskan dengan lebih sederhana sebagai

$$P_e = P_c + P_{max} \sin(\delta - \gamma) \quad (2.11)$$

Pada persamaan 2.11 di atas variabel  $P_e$  mewakili keluaran daya listrik dari generator (rugi jangkar diabaikan). Persamaan ini disebut dengan persamaan sudut-harga. Parameter  $P_c$ ,  $P_{maks}$ , dan  $\delta$  adalah konstanta untuk konfigurasi jaringan tertentu, besaran tegangan  $|E'_1|$  dan  $|E'_2|$  juga merupakan sebuah konstanta. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, jaringan dianggap tanpa resistansi dan semua unsur dari Yrel adalah susceptansi maka  $G_{11}$  dan  $\gamma$  keduanya bernilai nol. Sehingga persamaan sudut-harga yang didapatkan berlaku untuk jala-jala reaktansi murni adalah merupakan persamaan seperti yang sudah kita semua ketahui yaitu:

$$P_e = \frac{|E'_1||E'_2|}{X} \sin \delta \quad (2.12)$$

dimana:

$$X = X_G + X_L + X_M \quad (2.13)$$

dan  $X$  adalah reaktansi transfer antara  $E'_1$  dan  $E'_2$  atau sesuai dengan Gambar 2.3 [5].

### 2.2.2 Kestabilan Tegangan [4]

Kestabilan tegangan adalah kemampuan dari sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi *steady state* tegangan pada semua bus di sistem setelah mengalami gangguan. Kestabilan tegangan erat kaitannya keseimbangan antara permintaan beban dan suplai beban dari sistem tenaga listrik. Ketidakstabilan dapat mengakibatkan penurunan atau peningkatan tegangan pada suatu bus.

Penurunan bertahap tegangan pada suatu bus dapat berkaitan dengan kestabilan sudut rotor. Sebagai contoh hilangnya sinkronisasi pada suatu mesin dilihat dari perbedaan sudut rotor antara dua kelompok mesin apabila melebihi  $180^\circ$  maka menyebabkan penurunan tegangan yang signifikan dan cepat pada daerah disekitar gangguan.

Akibat yang mungkin terjadi karena ketidakstabilan tegangan adalah kehilangan beban pada suatu area atau lepasnya jaringan transmisi karena bekerjanya relay proteksi. Faktor utama yang menyebabkan ketidak stabilan tegangan adalah ketika gangguan yang terjadi menyebabkan kebutuhan daya reaktif meningkat diluar dari kapasitas sumber daya reaktif yang tersedia.

Seperti kestabilan sudut rotor, kestabilan tegangan terbagi menjadi dua subkategori seperti berikut :

✓ Kestabilan tegangan akibat gangguan besar

Adalah kemampuan dari sistem untuk menjaga tegangan tetap *steady* setelah mengalami gangguan besar seperti hilangnya pembangkitan dan gangguan hubung singkat. Terdapat suatu cara untuk menentukan kemampuan kestabilan tegangan pada suatu sistem, yaitu dengan memberi gangguan besar lalu dilakukan pengujian respon tidak linier dari sistem tenaga selama periode waktu yang cukup untuk melihat kinerja dan interaksi dari peralatan seperti motor, OLTC pada trafo dan pembatas arus medan pada generator. Waktu studi biasanya dapat ditambahkan beberapa detik hingga puluhan menit.

✓ Kestabilan tegangan akibat gangguan kecil

Adalah kemampuan sistem tenaga untuk menjaga tegangan tetap *steady* ketika mengalami gangguan kecil seperti perubahan daya pada beban.

### 2.2.3 Kestabilan Frekuensi [4]

Kestabilan frekuensi adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi frekuensi seperti keadaan semula setelah



terjadi gangguan yang menyebabkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan pembebanan. Kestabilan ini dapat bekerja dengan mempertahankan atau mengembalikan keseimbangan antara pembangkitan dan pembebanan akibat adanya hilangnya beban. Terkadang, permasalahan kestabilan frekuensi dikaitkan dengan ketidakmampuan dari respon peralatan, lemahnya koordinasi proteksi dan peralatan frekuensi atau kurangnya daya cadangan pembangkitan (*spining reserve*).

Selama penyimpangan frekuensi, besarnya tegangan bisa berubah secara signifikan, terutama pada kondisi *islanding* dengan *underfrekuensi load shedding*. Perubahan tegangan ini dapat lebih tinggi dari perubahan frekuensi sehingga hal ini mempengaruhi ketidakseimbangan beban pembangkitan.

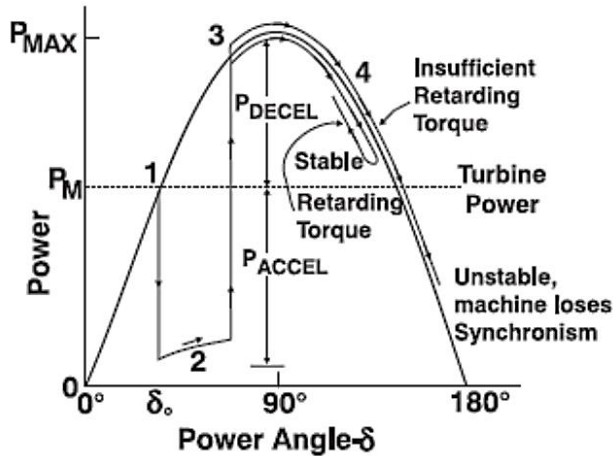
### **2.3 Kestabilan Transien.**

Stabilitas Transien adalah kemampuan sistem tenaga untuk menjaga stabilitas setelah gangguan besar dan bersifat mendadak. Studi stabilitas transien melihat apakah sinkronisasi terjadi atau tidak setelah mesin mengalami gangguan berat.

Kestabilan transien memerlukan evaluasi kemampuan sistem tenaga untuk menahan gangguan yang besar, dan untuk bertahan menuju kondisi operasi normal. Gangguan ini bisa berupa: short circuit pada saluran transmisi, generator lepas, kehilangan beban, penambahan beban atau kehilangan sebagian jaringan transmisi. Sejumlah besar simulasi dilakukan secara teratur selama tahap perencanaan untuk mendapatkan pengetahuan tentang sistem ini. Namun, sistem yang dirancang dengan baik tetap mungkin menghadapi resiko ketidakstabilan.

Setiap generator beroperasi pada kecepatan sinkron dan frekuensi yang sama ketika keseimbangan antara input daya mekanik dan output daya elektrik tetap terjaga. Setiap kali pembangkitan kurang dari beban konsumen, frekuensi sistem turun. Di sisi lain, setiap kali pembangkitan lebih dari beban sebenarnya, frekuensi sistem meningkat..

Setiap gangguan pada sistem akan menyebabkan ketidakseimbangan antara input daya mekanik ke generator dan output daya elektrik. Beberapa generator akan berputar mengencang dan beberapa akan melambat. Untuk generator tertentu, kecenderungan ini akan terlalu besar, hal ini menyebabkan hilang sinkron dengan sistem lainnya dan otomatis terputus dari sistem. Fenomena ini disebut sebagai generator yang keluar dari langkah.



**Gambar 2.6** Ilustrasi Kestabilan Transien[6]

Stabilitas transien terutama berkaitan dengan efek langsung dari gangguan saluran transmisi pada sinkronisme generator. Gambar 2.6 menggambarkan perilaku khas generator sebagai respons terhadap kondisi gangguan. Mulai dari kondisi operasi awal (titik 1), gangguan transmisi jarak dekat menyebabkan daya elektrik  $P_e$  menjadi berkurang drastis. Perbedaan yang dihasilkan antara daya elektrik dan daya turbin mekanik menyebabkan rotor generator mempercepat akselerasi sistem, meningkatkan sudut daya (titik 2). Bila kesalahan dihilangkan, daya elektrik dikembalikan ke tingkat yang sesuai dengan titik yang sesuai pada kurva sudut daya (titik 3). Menghilangkan gangguan berarti memutus satu atau lebih elemen transmisi dari layanan dan setidaknya untuk sementara melemahkan sistem transmisi. Setelah menghilangkan gangguan, tenaga listrik dari generator menjadi lebih besar dari pada daya turbin. Hal ini menyebabkan unit melambat (titik 4), mengurangi momentum rotor yang didapat saat terjadi kesalahan. Jika ada torsi yang cukup melambat setelah penghilangan gangguan untuk menebus akselerasi selama kesalahan, generator akan stabil secara sementara pada ayunan pertama dan akan bergerak kembali ke titik operasinya. Jika torsi melambat tidak mencukupi, sudut daya akan terus meningkat sampai sinkronisme dengan sistem daya hilang.[7]

### 2.3.1 Kestabilan Transien Sistem Multimesin

Umumnya saat dan setelah terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik skala besar, hanya beberapa (atau bahkan satu ) mesin saja yang terganggu oleh gangguan tersebut. Mesin dikatakan terganggu bisa ditentukan dengan melihat daya percepatan tiap mesin pada saat gangguan. Studi dilakukan dengan mengamati kestabilan mesin yang paling terganggu. Hal tersebut sudah cukup untuk menentukan kestabilan transien keseluruhan sistem. Mesin-mesin yang terganggu memiliki batas waktu kestabilan berbeda, tetapi mesin yang memiliki batas waktu kestabilan terendah bisa dikatakan sebagai mesin yang paling kritis. Hal ini disebabkan karena pada saat terjadi gangguan mesin paling kritis akan kehilangan sinkronisasi pertama kali (karena memiliki batas kestabilan terendah) dan secara berurutan akan menyebabkan mesin yang lain akan mengalami kondisi yang sama sehingga membentuk suatu urutan mesin yang tidak stabil dalam jumlah yang besar.

Apabila diumpamakan mesin  $i$  adalah mesin kritis, seperti pada sistem single machine infinite bus (SIMB), batas kestabilan mesin kritis bisa diketahui dari variasi kecepatan dan daya percepatannya pada kondisi setelah gangguan (*postfault*). Lintasan *postfault* mesin ke  $i$  bisa dianggap stabil (*first-swing*) jika sudut mesin mencapai harga puncak (kecepatan nol ) sementara daya percepatannya negatif.

$$\begin{aligned}\omega_i &= 0 \\ P_{ai} &< 0\end{aligned}$$

Dengan cara yang sama, lintasan *postfault* mesin kritis bisa dianggap tidak stabil jika sudutnya terus naik ketika daya percepatannya menjadi nol atau berubah tanda :

$$\begin{aligned}\omega_i &> 0 \\ P_{ai} &= 0\end{aligned}$$

Lintasan kritis bisa ditentukan oleh kejadian dimana kecepatan dan daya percepatan sama dengan nol pada waktu yang bersamaan pada kondisi setelah terjadi gangguan.

$$\begin{aligned}\omega_i &= 0 \\ P_{ai} &= 0\end{aligned}$$

Batas kestabilan mesin kritis ini bisa diketahui dengan membandingkan area percepatan dengan area perlambatan.

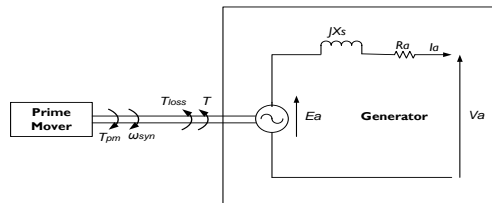
## 2.4 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan [5]

Persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin serempak didasarkan pada prinsip dasar dinamika yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali dari momen-momen kelembaman (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya. Dalam sistem unit-unit MKS dan untuk generator serempak, persamaan ini dapat ditulis dalam bentuk:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.15)$$

Simbol-simbol pada persamaan 2.15 mempunyai arti sebagai berikut:

- $J$  = Momen kelembaman total dari massa rotor dalam  $kg \cdot m^2$
- $\theta_m$  = Pergeseran sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam (*stationary*), dalam radian mekanis
- $t$  = Waktu, dalam detik
- $T_a$  = Momen putar percepatan bersih, dalam  $Nm$
- $T_m$  = Momen putar mekanis atau poros (penggerak) yang diberikan oleh penggerak mula dikurangi dengan momen putar perlambatan (*retarding*) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran, dalam  $Nm$
- $T_e$  = Momen putar listrik atau elektromagnetis bersih, dalam  $Nm$



**Gambar 2.7** Representasi Rotor Generator dengan Arah Rotasi dari Torsi Mekanik dan Torsi Elektrik.

Pada persamaan (2.15) karena  $\theta_m$  diukur terhadap sumbu yang diam, maka untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar terhadap kecepatan sinkron adalah seperti persamaan berikut:

$$\theta_m = \omega_m t - \delta_m \quad (2.16)$$

dengan  $\theta_m$  adalah pergeseran sudut rotor dalam satuan radian terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron. Penurunan persamaan diatas terhadap waktu memberikan kecepatan putaran rotor seperti persamaan berikut:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.17)$$

Dari persamaan (2.17) dan (2.15) maka didapatkan

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.18)$$

Jika persamaan 2.18 diatas dikalikan dengan  $\omega_m$  maka :

$$J \omega_m \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.19)$$

Dengan  $J \omega_m$  adalah momen sudut (*angular momentum*) rotor yang dinyatakan dengan M. Hubungan energi kinetik dengan massa berputar adalah sebagai berikut

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m \quad (2.20)$$

Atau

$$M = \frac{2W_k}{\omega_m} \quad (2.21)$$

Bila  $\omega_m$  tidak berubah sebelum stabilitas hilang maka M di evaluasi dengan kecepatan serempak sebagai berikut:

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \quad (2.22)$$

Persamaan ayunan dalam hubungannya dengan moment sudut adalah:

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.23)$$

Jika  $p$  adalah jumlah kutub generator sinkron maka sudut daya listrik  $\delta$  dalam hubungannya dengan sudut daya mekanik  $\delta_m$  adalah

$$\delta = \frac{P}{2} \delta_m$$

Maka persamaan ayunan dalam hubungannya dengan sudut daya listrik adalah

$$\frac{2}{P} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.24)$$

Bila persamaan 2.22 disubstitusikan ke persamaan 2.24 dan dibagi dengan daya dasar  $S_B$ . Akan menghasilkan persamaan sebagai berikut

$$\frac{2}{P} x \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} x \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{S_B} \quad (2.25)$$

Sekarang mendefinisikan suatu besaran yang dikenal sebagai konstanta  $H$ . Konstanta  $H$  didefinisikan sebagai energi kinetik (MJ) pada kecepatan sinkron dibagi dengan rating mesin (MVA) yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$H = \frac{W_k}{S_B} \quad (2.26)$$

Substitusikan persamaan 2.26 kedalam persamaan 2.25 maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut

$$\frac{2}{P} x \frac{2H}{\omega_{sm}} x \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.27)$$

Kecepatan listrik dalam hubungannya dengan kecepatan putar mekanik

$$\omega_{sm} = \frac{2}{P} \omega_0 \text{ Sehingga persamaannya menjadi :}$$

$$\frac{2H}{\omega_0} \chi \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.28)$$

$\delta$  adalah posisi angular dari rotor dalam electrical radian yang berhubungan dengan referensi putaran sinkron dan  $\delta_0$  adalah nilai pada saat  $t = 0$ ,

$$\delta = \omega_r t - \omega_0 t + \delta_0 \quad (2.29)$$

Jika diturunkan terhadap waktu, didapatkan

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_0 = \Delta\omega_r \quad (2.31)$$

dan

$$\begin{aligned} \frac{d^2\delta}{dt^2} &= \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{d(\Delta\omega_r)}{dt} \\ &= \omega_0 \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \omega_0 \frac{d(\Delta\bar{\omega}_r)}{dt} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Jika komponen torsi redaman (*damping*) disertakan kedalam persamaan 2.28 maka persamaan ayunan tersebut menjadi seperti berikut :

$$\frac{2H}{\omega_0} \chi \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e - K_D \Delta\bar{\omega}_r \quad (2.33)$$

## 2.5 Hal-Hal yang Mempengaruhi Kestabilan

### 2.5.1 Gangguan Hubung Singkat

Hubung singkat adalah gangguan yang paling sering terjadi dalam sistem tenaga listrik. Gangguan ini biasanya disebabkan oleh adanya sambaran petir, kegagalan isolasi bahkan gangguan akibat ranting pohon dan binatang.

Gangguan hubung singkat mengakibatkan timbulnya aliran arus dengan nilai yang besar menuju ke titik gangguan. Akibatnya tegangan di sekitar gangguan dapat menurun signifikan. Aliran arus yang besar tersebut merupakan jumlah dari arus kontribusi yang berasal dari generator serta motor induksi.

### 2.5.2 Starting Motor

Suatu *starting* motor dapat mengakibatkan lonjakan arus yang besarnya 5x atau 6x dari arus ratingnya. Periode ini berlangsung ketika

motor mencapai 80% atau 90% dari kecepatan sinkronnya. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya drop tegangan di sistem, oleh sebab itu motor starting dianggap sebagai gangguan yang mempengaruhi kestabilan sistem.

Saat penyalan motor induksi, drop tegangan dapat mempengaruhi unjuk kerja dan umur dari peralatan terpasang. Apabila drop tegangan yang terjadi melebihi standar yang ditentukan untuk suatu peralatan listrik, maka hal ini dapat menyebabkan stabilitas tegangan sistem menjadi terganggu. Oleh karena itu perlu dilakukan suatu analisis *starting* motor.

### **2.5.3 Penambahan Beban Secara Tiba-tiba**

Penambahan beban secara tiba-tiba dapat dikategorikan sebagai gangguan. Penambahan beban pada suatu sistem tenaga listrik bisa menimbulkan gangguan apabila:

- Jumlah beban melebihi batas kestabilan keadaan untuk kondisi tegangan dan reaktansi rangkaian tertentu
- Jika beban dinaikkan sampai terjadi osilasi, sehingga menyebabkan sistem mengalami ayunan yang melebihi titik kritis yang tidak dapat kembali.

Jika sistem tenaga listrik dilakukan ditambahkan dengan beban hingga penuh secara tiba-tiba, maka arus yang ditimbulkan akan sangat besar akibatnya frekuensi sistem akan turun dengan cepat. Pada kondisi seperti ini sistem akan hilang sinkron walaupun besar beban belum mencapai daya maksimumnya, Hal ini dikarenakan daya output elektrik generator jauh melampaui daya masukan mekanis generator atau daya yang dihasilkan penggerak mula, dan kekurangan ini disuplai dengan berkurangnya energi kinetis generator. Sehingga putaran generator turun atau frekuensi sistem turun, sudut daya  $\delta$  bertambah besar dan melampaui sudut kritisnya, akibatnya generator akan lepas sinkron atau tidak stabil. Sesaat dilakukannya pembebanan tersebut, rotor generator akan mengalami ayunan dan getaran yang besar [6].

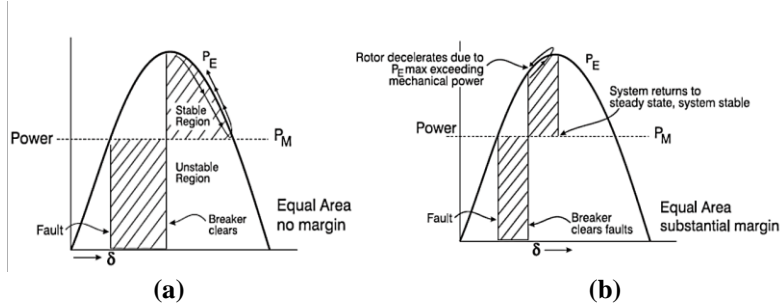
## **2.8 Critical Clearing Time (CCT)**

Analisa kestabilan transien salah satunya digunakan untuk menentukan skema relaying, pemilihan pemutus arus, perancangan sistem proteksi dan analisa kemampuan transfer antara sistem. *Critical Clearing Time* adalah kriteria utama untuk penilaian stabilitas transien.



Osilasi sudut rotor harus dijaga berada dibawah 180 derajat untuk memastikan operasi stabil.

*Critical clearing Time* adalah waktu yang diijinkan untuk memutuskan gangguan agar generator tidak mengalami lepas sinkron. Apabila gangguan diputus kurang dari waktu kritis (*Critical Clearing Time*) yang telah ditentukan maka generator akan kembali stabil, namun apabila gangguan diputus melebihi dari waktu kritis (*Critical clearing Time*) yang telah ditentukan maka generator akan berada pada kondisi tidak stabil dan dapat lepas sinkron.

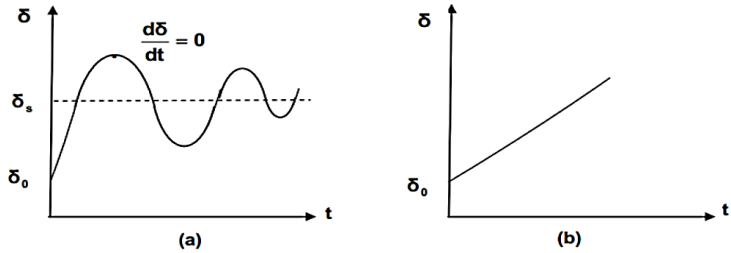


**Gambar 2.8** Efek Waktu Pemutusan Gangguan[6]

Stabilitas sistem tenaga khususnya transien bergantung pada waktu pemutusan gangguan pada sistem transmisi. Untuk memperjelas mengenai hal ini maka ditunjukkan oleh Gambar 2.8. Pada contoh pemutusan gangguan yang lebih lambat pada Gambar 2.8 (a), durasi waktu dari gangguan memungkinkan rotor untuk mengencang sepanjang kurva  $P_E$  sehingga torsi yang melambat mendekati batas mempertahankan rotor dalam sinkronisme. Waktu pemutusan kritis yang lebih pendek pada Gambar 2.8 (b) menghentikan percepatan rotor lebih cepat, memastikan bahwa torsi sinkronisasi yang memadai tersedia untuk pulih dengan margin keselamatan yang besar. Efek ini berguna untuk memasang peralatan tercepat yang tersedia untuk melindungi sistem transmisi.[6]

Kurva ayunan digunakan untuk mengetahui kestabilan sistem. Jika sudut rotor  $\delta$  mencapai maksimum dan kemudian menurun, maka itu menunjukkan bahwa sistem stabil. Di sisi lain jika sudut rotor  $\delta$  meningkat tanpa batas waktu, maka itu menunjukkan bahwa sistem tidak stabil.[6]

Kurva ayunan, yang merupakan plot sudut torsi  $\delta$  vs waktu  $t$ , dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan ayunan. Dua kurva ayunan yang biasa terjadi ditunjukkan pada gambar 2.9.[6]



**Gambar 2.9** Kurva Ayunan[6]

Pada Gambar 2.9 (a) mesin dapat dikatakan stabil karena sudut rotor cenderung kembali ke keadaan semula. Sedangkan gambar 2.9 (b) mesin dapat dikatakan tidak stabil karena sudut rotor terus meningkat hingga waktu yang tidak dapat dikathui.

## BAB III

### SISTEM KELISTRIKAN TRANSMISI SUMATERA UTARA

#### 3.1 Data Kelistrikan Sumatera Utara

Sistem kelistrikan pada tugas akhir ini meliputi sistem kelistrikan 150 kV di Sumatera Utara. Namun sebagian besar sistem transmisi yang digunakan adalah 150 kV. Saluran pada sistem kelistrikan Sumatera Utara berbeda-beda. Terdapat sistem yang menggunakan skema *double circuit* maupun *single circuit*.

Sistem transmisi Sumatera Utara yang akan dibahas pada tugas akhir ini meliputi :

1. Sumatera Utara tahun 2025 beban penuh (*peak*)
2. Sumatera Utara tahun 2025 beban normal (*normal*)

Berikut ini adalah data saluran transmisi, pembangkitan masing-masing generator pada beban peak maupun normal, dan pembebanan yang digunakan pada tiap bus pada beban peak maupun normal. Untuk Single Line Diagram akan dilampirkan

**Tabel 3.1** Data Saluran Transmisi Sumatera Utara 2025

Line	Dari	Ke	R(pu)	X(pu)	Z(pu)	Y(pu)
2	K Tanjung	Kisaran	2.06	7.41	7.69	5.0942380
3	Percut	KIM	0.02	0.11	0.11	0.4183347
4	Rantau Prapat	P.Sidempuan	8.92	22.72	24.41	7.8179060
5	Rantau Prapat	G.Tua	8.92	22.72	24.41	7.8179060
6	G.Tua	P.Sidempuan	8.92	22.72	24.41	7.8179060
7	Belawan PLTU	Paya Pasir	0.13	0.79	0.80	0.5672688
8	AEK Kanopan	Rantau Prapat	0.90	2.89	3.02	10.1072600
9	Kisaran	AEK Kanopan	0.90	2.89	3.02	10.1072600
10	K Tanjung	Kisaran	2.06	7.41	7.69	5.0942380
11	Sigundong	Tarutung	1.70	6.09	6.32	4.1894870
12	Percut	Pancing	0.10	0.56	0.57	2.0916730
13	T.Tinggi	K.Tanjung	0.64	2.06	2.16	7.2266890

**Tabel 3.1** Data Saluran Transmisi Sumatera Utara 2025 (Lanjutan)

Line	Dari	Ke	R(pu)	X(pu)	Z(pu)	Y(pu)
14	Perbaungan	Sei Rotan	2.62	6.68	7.18	2.3000140
15	T.Tinggi	Sei Rotan	3.84	9.79	10.52	3.3697000
16	T.Tinggi	Perbaungan	3.87	9.86	10.59	3.3930090
17	T.Morawa	Denai	0.80	2.04	2.19	0.7024146
18	Denai	Sei Rotan	0.82	2.09	2.25	0.7206837
19	Sei Rotan	T.Morawa	0.56	1.42	1.53	0.4888554
20	Sei Rotan	Belawan PLTGU	0.55	3.33	3.38	2.4220290
21	Lbhn Angin	Sibolga	1.04	3.73	3.88	2.5671750
23	Belawan PLTGU	Binjai	0.35	1.93	1.97	7.2094400
24	P Brandan	Binjai	0.91	2.93	3.07	10.2710000
25	Wampu	Brastagi	1.44	5.18	5.38	3.5655210
26	Sei Rotan	Percut	0.02	0.11	0.11	0.4183347
27	Sei Rotan	Paya Pasir	0.36	1.36	1.40	4.8479800
28	Percut	Sumbagut 1	0.08	0.51	0.51	0.3671131
29	Sei Rotan	Titi Kuning	0.53	2.21	2.27	1.5477410
30	Belawan PLTU	Paya Pasir	0.13	0.79	0.80	0.5672688
31	Glugur	Paya Geli	0.37	1.53	1.57	1.0726250
33	Paya Pasir	Mabar	0.09	0.34	0.35	1.2119950
34	Paya Pasir	Paya Geli	0.32	1.22	1.26	4.3472390
35	Dolok Sanggul	Pakkat	1.26	4.54	4.71	3.1198310
37	Binjai	Paya Geli	0.25	0.80	0.84	2.8138600
38	Percut	Sumbagut 1	0.08	0.51	0.51	0.3671131
39	Bus 11	Paya Geli	0.37	1.53	1.57	1.0726210
40	Paya Geli	Titi Kuning	1.87	5.51	5.81	1.9452790
41	Titi Kuning	Namurambe	0.76	2.25	2.37	0.7942001
42	Namurambe	Paya Geli	1.13	3.34	3.53	1.1804470
44	GIS Listrik	Titi Kuning	0.14	0.46	0.48	1.6030110
45	Titi Kuning	Brastagi	0.94	3.02	3.16	10.5721900
47	P.Siantar	Porsea	1.30	4.18	4.38	14.6514800
48	Parlilitan	Dolok Sanggul	0.54	1.94	2.02	1.3370700

**Tabel 3.1** Data Saluran Transmisi Sumatera Utara 2025 (Lanjutan)

Line	Dari	Ke	R(pu)	X(pu)	Z(pu)	Y(pu)
49	Porsea	Tarutung	1.11	3.56	3.73	12.4703300
50	Sumut 2	Perdagangan	0.02	0.15	0.15	1.9814930
51	Sibolga	Tarutung	0.89	2.86	2.99	10.0102300
52	Salak	Sidikalang	0.54	1.94	2.02	1.3370700
53	P.Sidempuan	Sibolga	1.27	4.09	4.28	14.3078300
54	Batu Ginging	Paya Geli	0.36	1.30	1.35	0.8913802
55	Dolok Sanggul	Tarutung	4.53	11.53	12.39	3.9688000
56	Tarutung	Tele	5.86	14.93	16.04	5.1367610
57	Tele	Sidikalang	2.90	7.39	7.94	2.5419220
58	Brastagi	Sidikalang	4.60	11.71	12.58	4.0305370
59	Renun 2	Sidikalang	1.82	4.63	4.97	1.5931900
60	Brastagi	Renun 2	3.64	9.26	9.95	3.1870100
61	G.Para	P.Siantar	0.43	1.39	1.45	4.8514830
62	T.Tinggi	G.Para	0.43	1.39	1.45	4.8514830
64	Labuhan	Belawan PLTU	0.21	0.54	0.58	0.1858406
65	Lamhotma	Labuhan	0.23	0.59	0.63	0.2015899
66	Sumut 2	Perdagangan	0.02	0.15	0.15	1.9814930
69	Simangkok	Porsea	0.04	0.13	0.14	0.4689767
70	Galang	Neeri Dolok	0.23	1.39	1.41	1.0095610
72	Tanah Jawa	P.Siantar	0.90	3.24	3.36	2.2284510
73	Labuhan Angin	Sibolga	1.04	3.73	3.88	2.5671750
75	Simangkok	Sarulla	0.56	3.38	3.43	27.7629300
76	Sipan 1	Sibolga	0.56	1.43	1.54	0.4932652
77	Sipan 2	Sibolga	0.56	1.43	1.54	0.4932652
78	Sipan 2	Sipan 1	0.56	1.43	1.54	0.4932652
80	Bus81	Bus82	0.43	2.63	2.66	21.5625400
81	Lamhotma	Belawan PLTU	0.43	1.10	1.18	0.3779809
83	Sumbagut 3 4	Galang	0.22	1.32	1.33	10.7967000
85	Kualanamu	T.Morawa	0.25	0.80	0.84	2.8138600
87	Sei Rotan	KIM	1.23	5.28	5.42	1.9523430

**Tabel 3.1** Data Saluran Transmisi Sumatera Utara 2025 (Lanjutan)

Line	Dari	Ke	R(pu)	X(pu)	Z(pu)	Y(pu)
89	P Brandan	Pngkln Susu	0.18	0.58	0.60	2.0214510
91	Pangkaln susu	Binjai	0.43	2.63	2.66	21.5625400
93	Wampu	Brastagi	1.44	5.18	5.38	3.5655210
95	Brastagi	Dairi	5.39	13.73	14.75	4.7247620
97	Dairi	Kuta Cane (NAD)	7.55	19.22	20.65	6.6146670
99	Kuta Cane (NAD)	Brastagi	8.62	21.97	23.60	7.5596190
101	Salak	Sidikalang	0.54	1.94	2.02	1.3370700
103	Sidikalang	Dolok Sanggul	4.53	11.53	12.39	3.9688000
105	Parililitan	Dolok Sanggul	0.54	1.94	2.02	1.3370700
107	Dolok Sanggul	Pakkat	1.26	4.54	4.71	3.1198310
109	Namurambe	Galang	0.49	2.69	2.74	10.0392600
111	Binjai	Galang	0.27	1.50	1.53	63.2682300
113	Galang	Negeri Dolok	0.23	1.39	1.41	1.0095610
115	Galang	T.Morawa	1.60	8.75	8.89	32.6275800
117	Simangkok	Galang	0.48	2.60	2.65	109.6649000
119	Simangkok	Sarulla	0.56	3.38	3.43	27.7629300
121	Rantau Prapat	Sarulla	0.30	1.64	1.66	68.8920700
123	NPSidempuan	P.Sidempuan	0.18	0.58	0.60	2.0214510
125	Penyabungan	N P.Sidempuan	1.25	4.04	4.23	14.1501600
129	Tanah Jawa	P.Siantar	0.90	3.24	3.36	2.2284510
131	Sumbagut 3 4	Galang	0.22	1.32	1.33	10.7967000
137	KIM	KIM II	0.21	0.88	0.91	0.3282735
139	KIM II	Sei Rotan	1.03	4.41	4.53	1.6413670
141	Pancing	KIM II	0.21	1.08	1.09	4.3381640
143	Sei Kera	Denai	0.33	1.41	1.45	0.5252376
145	Pancing	Sei Kera	0.33	1.41	1.45	0.5252376
147	Pancing	Denai	0.33	1.41	1.45	0.5252376
149	Perbaungan	Kualanamu	0.18	0.58	0.60	2.0214510
151	Labuhan Bilik	Rantau Prapat	0.63	2.02	2.12	7.0750800

**Tabel 3.1** Data Saluran Transmisi Sumatera Utara 2025 (Lanjutan)

Line	Dari	Ke	R(pu)	X(pu)	Z(pu)	Y(pu)
155	Sibuhuan	G.Tua	1.61	5.19	5.44	18.1930600
157	Kisaran	Tanjung Balai	0.36	1.15	1.21	4.0429030
159	Perdagangan	K.Tanjung	0.57	1.85	1.93	6.4686450
161	Perdagangan	Kisaran	0.63	2.02	2.12	7.0750800
163	Paya Geli	Selayang	0.16	0.52	0.54	1.8193060
164	Namurambe	Selayang	0.16	0.52	0.54	1.8193060
166	Bus640	Paya Geli	0.36	1.30	1.35	0.8913802
167	Batu Gingging	GIS Listrik	0.09	0.29	0.30	1.0107260
169	KIM	Mabar	0.36	1.36	1.40	4.8479800
171	Sei Kera	Teladan	0.09	0.34	0.35	1.2263020
173	Teladan	Titi Kuning	0.08	0.29	0.30	1.0219180
175	Paya Geli	Helvetia	0.08	0.29	0.30	1.0219180
177	Glugur	Helvetia	0.08	0.29	0.30	1.0219180
179	N P Sidempuan	Sarulla	0.22	1.18	1.20	49.9116000
181	Tele	Pangururan	0.45	1.44	1.51	5.0536290
183	Binjai	Kuala	0.16	0.52	0.54	1.8193060
185	P Brandan	Tanjung Pura	0.45	1.44	1.51	5.0536290
187	Binjai	Tanjung Pura	0.45	1.44	1.51	5.0536290
189	P.Sidempuan	Martabe	0.01	0.03	0.03	0.1010726
191	Sibolga	Martabe	0.01	0.03	0.03	0.1010726
193	Natal	Penyabungan	0.90	2.89	3.02	10.1072600
195	Sumbagut 3 4	Pangkalan Susu	0.24	1.33	1.36	56.2384200
196	Sigundong	Tarutung	1.70	6.09	6.32	4.1894870
203	Sei Rotan	Bus33	0.55	3.33	3.38	2.4220290
204	Rantau Prapat	Kota Pinang.	1.05	3.37	3.53	11.8052800
208	Sei Rotan	Bus94	1.05	3.08	3.26	1.1065400
131-1	Simangkok	Asahan-3	1.26	4.54	4.71	3.1198420
133-1	Hasang	AEK Kanopan	0.90	3.24	3.36	2.2284510

**Tabel 3.1** Data Saluran Transmisi Sumatera Utara 2025 (Lanjutan)

Line	Dari	Ke	R(pu)	X(pu)	Z(pu)	Y(pu)
199-1	N P Sidempuan	Batang Toru	0.39	2.12	2.15	89.2785000
199-3	Sei Rotan	Rantau Prapat	0.47	2.84	2.88	254.9397000
199-4	Sarulla	Batang Toru	0.28	1.69	1.71	13.8814700
199-4-1	Penyabungan	Sorik Merapi	0.36	1.30	1.35	0.8913802
199-6	Bus636	Bus635	0.28	1.69	1.71	13.8814700
200-1-1	Natal	Sorik Merapi-1	0.18	0.58	0.60	2.0210190

**Tabel 3.2** Daftar Pembangkit Sumatera Utara 2025

ID	PEAK		NORMAL	
	MW	Mvar	MW	Mvar
BLWN-GU-1	120	70.016	75	28.166
BLWN-GU-2	120	70.016	75	28.166
BLWN-GU-3	120	70.016	75	28.166
BLWN-GU-4	120	70.016	75	28.166
BLWN-GU-5	120	70.016	75	28.166
BLWN-GU-6	120	70.016	75	28.166
BLWN-U-1	44	27.644	27	5.993
BLWN-U-2	44	27.644	27	5.993
BLWN-U-3	44	27.644	27	5.993
BLWN-U-4	44	27.644	27	5.993
PLTA ASAHAN 3-1	130	9.05	70	0.379
PLTA ASHN 1-1	72	17.442	35	6.479
PLTA ASHN 1-2	72	17.442	35	6.479
PLTA Bt Toru-2-1	100	2.437	50	2.565



**Tabel 3.2** Daftar Pembangkit Sumatera Utara 2025 (Lanjutan)

ID	PEAK		NORMAL	
	MW	Mvar	MW	Mvar
PLTA Bt Toru-3-1	100	2.437	50	2.565
PLTA Bt Toru-4-1	100	2.437	50	2.565
PLTA Bt Toru-5-1	100	2.437	50	2.565
PLTA HASANG-1	30	10.712	20	1.962
PLTA INALUM	72	10.412	35	6.553
PLTA RENUN-1	32.8	16.285	20	8.291
PLTA RENUN-2	32.8	16.285	20	8.291
PLTA SGNDONG-1	28	2.601	15	2.057
PLTA SGNDONG-2	28	2.601	15	2.057
PLTA SGNDONG-5	60	2.871	20	2.002
PLTA SIPAN-1	26	7.989	13	1.815
PLTA SIPAN-2	13.6	8.116	6	1.993
PLTA WAMPU	35	8.571	22	5.438
PLTD GLUGUR	25	9.629	15	7.841
PLTD TITI KUNING	19	5.092	12	7.043
PLTG PAYA PASIR	20	5.596	13	6.019
PLTGU SUMBAGUT 1	27.807	104.278	41.732	83.11
PLTGU SUMBAGUT 3	200	30.756	125	15.149
PLTGU SUMBAGUT 4	200	30.756	125	15.149
PLTMH DAIRI	30	18.565	20	1.759
PLTMH PAKKAT	23	3.646	14	3.35
PLTMH PARLILITAN	40	4.335	25	3.624
PLTMH SALAK	38	17.795	24	1.324
PLTMH TERSEBAR II	25	1.97	15	3.014
PLTMH TNH JAWA	50	27.574	25	2.488

**Tabel 3.2** Daftar Pembangkit Sumatera Utara 2025 (Lanjutan)

ID	PEAK		NORMAL	
	MW	Mvar	MW	Mvar
PLTP S. Merapi-1	190	3.993	120	5.922
PLTP SARULLA 1-2-1	80	9.571	44	7.351
PLTP SARULLA 1-2-3	85	9.694	44	7.351
PLTP SARULLA 1-2-4	85	9.694	44	7.351
PLTP SIBANYAK	8	5.32	5	7.898
PLTU LBHN ANGN-1	92	9.869	45	13.475
PLTU LBHN ANGN-2	92	9.869	45	13.475
PLTU P SUSU 1-1	176	45.059	110	36.914
PLTU P SUSU 1-2	176	45.059	110	36.914
PLTU P SUSU 2-1	160	44.585	100	36.806
PLTU P Susu 2-2	160	44.585	100	36.806
PLTU SUMUT 2-1	240	59.386	150	52.775
PLTU SUMUT 2-2	240	59.386	150	52.775
PLTU SUMUT a-1	120	63.493	75	14.015
PLTU SUMUT b-1	120	63.493	75	14.015
Sumbagteng2	80	19.589	50	18.672
Sumbagteng3	400	107.919	100	36.926

**Tabel 3.3** Daftar Beban Sumatera Utara 2025

ID	NORMAL	PEAK	ID	NORMAL	PEAK
	MW	MW		MW	MW
Lump2	24.3	34.02	Lump5	11.88	22.14
Lump3	18.9	17.82	Lump6	24.3	34.02
Lump4	11.88	22.14	Lump8	24.3	34.02

**Tabel 3.3** Daftar Beban Sumatera Utara 2025 (Lanjutan)

ID	NORMAL	PEAK	ID	NORMAL	PEAK
	MW	MW		MW	MW
Lump10	23.76	51.84	Lump34-3	8.1	31.32
Lump11	26.46	37.26	Lump36	32.94	46.98
Lump12	43.2	40.5	Lump37	32.94	46.98
Lump13	43.2	40.5	Lump38	27.54	43.74
Lump15	24.84	58.86	Lump39	10.8	15.12
Lump16	15.66	44.28	Lump40	21.6	40.5
Lump17	17.28	48.6	Lump41	21.6	40.5
Lump18	17.82	17.82	Lump43	43.2	40.5
Lump19	27.36	64.08	Lump44	23.76	51.84
Lump20	5.94	39.96	Lump45	19.44	23.22
Lump21	13.5	37.8	Lump46	23.76	51.84
Lump22	27.36	64.08	Lump47	23.76	51.84
Lump23	27.36	64.08	Lump48	21.6	41.04
Lump24	29.7	28.08	Lump49	23.76	51.84
Lump25	29.7	28.08	Lump50	21.6	40.5
Lump26	35.1	49.68	Lump51	16.2	15.66
Lump27	35.1	49.68	Lump52	16.2	15.66
Lump28	29.7	28.08	Lump54	14.042	39.425
Lump29	29.7	28.08	Lump55	14.042	39.425
Lump30	10.8	20.52	Lump57	37.26	49.14
Lump31	21.6	41.04	Lump58	37.26	49.14
Lump32	11.663	29.159	Lump59	24.3	54
Lump33	15.12	14.31	Lump60	24.3	54
Lump34	21.6	41.04	Lump61	24.3	54
Lump34-1	8.1	31.32	Lump62	24.3	54

**Tabel 3.3** Daftar Beban Sumatera Utara 2025 (Lanjutan)

ID	NORMAL	PEAK	ID	NORMAL	PEAK
	MW	MW		MW	MW
Lump64	26.46	37.26	Lump92	31.86	56.7
Lump65	26.46	37.26	Lump93	31.86	56.7
Lump67	24.84	58.86	Lump95	14.042	39.425
Lump68	37.26	49.14	Lump96	22.14	52.38
Lump69	24.84	58.86	Lump97	22.14	52.38
Lump70	19.98	31.32	Lump99	24.3	54
Lump71	19.98	31.32	Lump100	5.94	39.96
Lump72	10.26	9.72	Lump102	13.5	37.8
Lump73	10.26	9.72	Lump103	3.78	3.51
Lump74	3.33	1.08	Lump105	0.54	0.54
Lump75	14.58	25.38	Lump106	2.43	2.43
Lump77	14.58	25.38	Lump107	4.59	4.59
Lump78	27.54	43.74	Lump108	33.84	48.24
Lump79	5.04	4.68	Lump109	15.66	29.7
Lump80	27.54	43.74	Lump110	33.84	48.24
Lump81	24.84	24.84	Lump111	9.45	9.45
Lump82	25.92	24.84	Lump112	23.76	22.68
Lump83	25.92	24.84	Lump113	32.94	46.98
Lump84	27.54	43.74	Lump115	33.12	62.64
Lump85-1	24.3	59.94	Lump117	31.86	56.7
Lump86	24.3	59.94	Lump118	33.12	62.64
Lump87	15.66	29.7	Lump120	15.66	44.28
Lump88	19.44	23.22	Lump121	24.841	64.802
Lump90	23.22	30.78	Lump122	24.84	64.801
Lump91	23.22	30.78	Lump123	22.14	52.38

**Tabel 3.3** Daftar Beban Sumatera Utara 2025 (Lanjutan)

ID	NORMAL	PEAK	ID	NORMAL	PEAK
	MW	MW		MW	MW
Lump124	17.28	48.6	Lump144	8.37	8.1
Lump126	17.28	16.47	Lump146	8.37	8.1
Lump127	33.48	47.52	Lump148	1.89	7.29
Lump130	33.48	47.52	Lump150	1.98	7.29
Lump132	4.86	4.86	Lump152	19.44	18.36
Lump135	9.72	9.18	Lump154	19.44	18.36
Lump137	11.88	11.34	Lump158	24.841	64.802
Lump138	11.88	11.34	Lump159	24.84	64.801
Lump140	33.84	48.24	Lump161-1	30.24	64.8
Lump143	33.12	62.64	Lump161-3	30.24	64.8

### 3.2 Data Kontrol Generator

Pemodelan dinamis stabilitas transien dari sistem transmisi Sumatera Utara 150 kV dapat di lihat pada tabel 3.4. Pemodelan ini adalah pemodelan dinamis kontroler sistem tenaga listrik yaitu exciter dan governor yang direpresentasikan sesuai standar untuk software stabilitas transien.

Nilai parameter yang di inputkan untuk data governor atau exciter pada generator mengikuti nilai sample data dari software Etap 12.6 dengan asumsi bahwa nilai tersebut adalah nilai terbaik untuk memperbaiki respon tegangan dan frekuensi setelah terjadinya gangguan.

**Tabel 3.4** Pemodelan dinamis untuk unit generator pada sistem Sumatera Utara 150 – 275 kV

MODEL	STANDARD	DESKRIPSI	LOKASI PEMBANGKIT
<b>Exciter</b>			
ETAP-12.6 model	IEEE	IEEE AC1A dan AC5A	Semua unit generator sistem Sumatera Utara
<b>Governor</b>			
ETAP-12.6 model	Industry	General Purpose Governor-Turbine system	Semua unit PLTA sistem Sumatera Utara
ETAP-12.6 model	IEEE	IEEE Gas-Turbine	Semua unit PLTG dan PLTGU sistem Sumatera Utara
ETAP-12.6 model	IEEE	General Steam-Turbine representation	Semua unit PLTU sistem Sumatera Utara

### 3.2 Metodologi Simulasi

Metodologi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pengumpulan Data

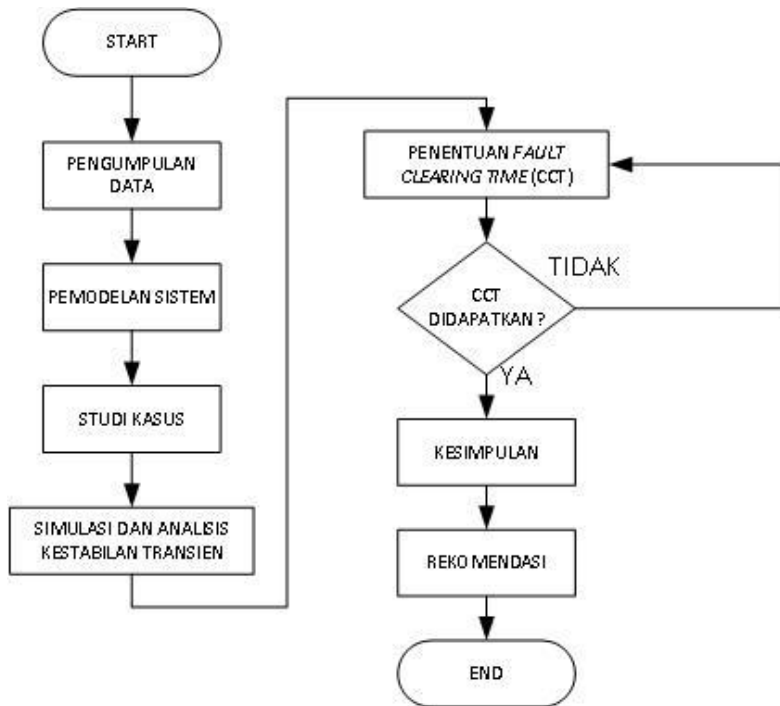
Pengumpulan data-data sistem kelistrikan Sumatera Utara Menurut tahun 2025.

2. Pemodelan Sistem

Setelah semua data sistem kelistrikan didapatkan, maka dilakukan pemodelan sistem dalam bentuk single line diagram dan sekaligus memasukkan data yang diperoleh pada single line diagram agar dapat dicari nilai *Critical Clearing Time* (CCT).

3. Simulasi dan analisis kestabilan transien

Penentuan CCT untuk analisis kestabilan transien dilakukan dengan menggunakan software ETAP untuk mengetahui respon dari sudut rotor. Respon sudut rotor pada sistem dapat digunakan sebagai acuan untuk mendapatkan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) yang akurat.



**Gambar 3.1** Flowchart Metodologi

#### 4. Studi Kasus

Studi kasus dilakukan dengan mencari aliran daya terbesar dari sistem kelistrikan Sumatera Utara Tahun 2025. Kemudian studi kasus dipilih berdasarkan 20 aliran daya terbesar pada sistem.

#### 5. Penentuan *Critical Clearing Time* (CCT)

Penentuan *Critical Clearing Time* (CCT) dilakukan dengan menentukan waktu pemutusan circuit breaker pada sistem. Metode yang digunakan yaitu metode *time domain simulation*. Setelah itu, penentuan *Critical Clearing Time* (CCT) dilanjutkan dengan mengamati respon sudut rotor. *Critical Clearing Time* (CCT) ditemukan berdasarkan waktu respon sudut rotor yang stabil dan tidak stabil.

6. Penarikan Kesimpulan

Memberikan kesimpulan mengenai CCT (*Critical Clearing Time*) yang didapatkan pada Sistem Kelistrikan 150kV Sumatera Utara Tahun 2025 serta memberikan rekomendasi untuk menentukan setting waktu maksimal *Circuit Breaker* (CB) pada sistem kelistrikan Sumatera Utara Tahun 2025.



## BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

### 4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan Sumatera Utara

Pemodelan sistem dilakukan dengan cara membuat *single line diagram* kelistrikan sumatera utara pada *software* simulasi ETAP 12.6. Kemudian akan dilakukan simulasi stabilitas transien gangguan hubung singkat untuk menentukan nilai *Critical Clearing Time (CCT)* menggunakan metode *time domain simulation*. Data pembangkitan dan beban ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

**Tabel 4.1** *Summary of Total Generation and Demand*

Sumatera Utara	Normal	Peak
Load-MW	2905.731	5130.007
Load-Mvar	806.337	1541.348
Generation-MW	2905.731	5130.007
Generation-Mvar	806.337	1541.348
Loss-MW	65.631	235.788
Loss-Mvar	-1094.173	179.049

Kasus yang di analisis pada tugas akhir ini hanyalah *Critical Clearing Time (CCT)*, tidak termasuk skema pelepasan beban. Faktor yang diperhatikan juga hanya respon sudut rotor. Pada kasus ini terjadi hubung singkat 3 fasa di bus kemudian dicari waktu pemutusan kritisnya dengan membuka nya CB pada saluran bus tersebut

### 4.2 Metode Time Domain Simulation

Time domain simulation adalah metode konvensional yang dapat digunakan untuk menentukan *Critical Clearing Time*. Metode ini dilakukan dengan cara melihat respon sudut rotor dari generator setelah pemulihan gangguan pada waktu tertentu.

Respon sudut rotor dapat terlihat stabil dan tidak stabil. CCT yang dicari yaitu waktu terakhir sebelum sistem tidak stabil. Metode ini bekerja dengan cara mencoba antara waktu respon sudut rotor yang stabil dan tidak stabil. Keakuratan waktu yang diambil yaitu tiga angka dibelakang koma.

Berikut adalah algoritma yang digunakan untuk mencari CCT menggunakan metode time domain simulation :

1. Tentukan waktu pemulihan pertama yaitu 1 detik.
2. Perhatikan respon sudut rotor
3. Jika stabil, maka tambah waktu pemulihan 1 detik.
4. Jika tidak stabil, kurangi waktu pemulihan menjadi setengahnya dari waktu pemulihan sebelumnya.
5. Perhatikan sudut rotor
6. Jika stabil, kembali ke langkah 3
7. Jika tidak stabil, ambil waktu tengah antara waktu yang stabil dan tidak stabil
8. Lakukan setting pemulihan waktu hanya tiga angka dibelakang koma.
9. Lakukan hingga ditemukan waktu stabil dan tidak stabil berbeda 0.001 detik.
10. Lakukan langkah 3 hingga waktu 5 detik, selebihnya dapat disimpulkan bahwa CCT tidak ditemukan

#### 4.3 Simulasi *Critical Clearing Time*

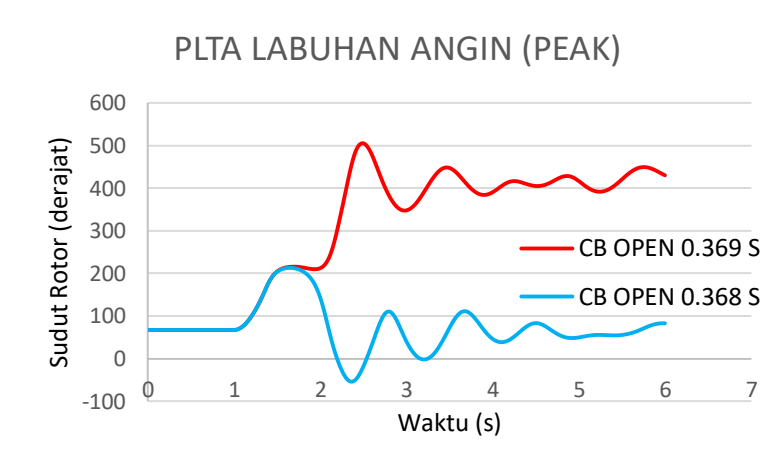
Pada simulasi CCT akan diambil beberapa saluran pada tahun 2025 untuk dianalisa pada beban puncak (*peak load*) dan beban normal (*normal load*). Saluran yang dipilih yaitu saluran yang tersambung ke bus pembangkit.

Pada kasus ini, gangguan yang disimulasikan adalah gangguan hubung singkat 3 fasa pada saluran. Titik gangguan pada saluran yaitu dipilih yang lebih dekat dengan pembangkit. Gangguan hubung singkat 3 fasa ini dipilih berdasarkan saluran yang menuju pembangkit, kemudian diikuti dengan lepasnya saluran tunggal ( *one circuit* ) dari saluran ganda.

##### a) CCT Saluran Labuhan Angin – Sibolga

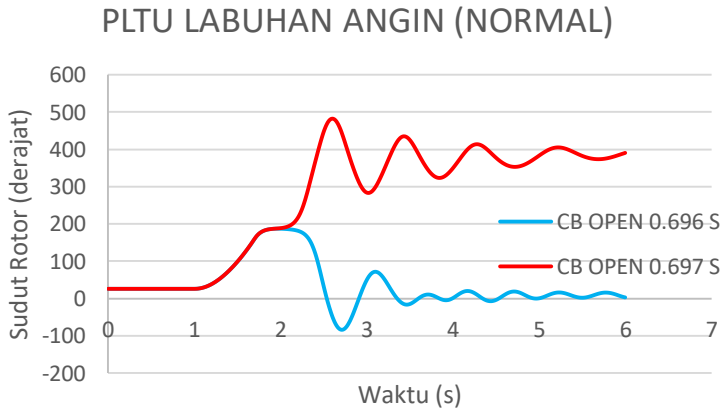
Pada tahun 2025 beban puncak, *short circuit* 3 fasa dilakukan di saluran labuhan angin - sibolga. Generator yang akan diperhatikan yaitu PLTU Labuhan Angin. Kemudian satu saluran dari saluran ganda lepas. Dengan metode *time domain simulation* didapatkan waktu pemutusan kritisnya (*CCT*) antara (  $t = 0.368$  dan  $0.369$  detik). Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.1. Pada saat  $t = 0.368$  generator stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut kurang dari 180 derajat. Sedangkan pada saat  $t = 0.369$  generator tidak stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut lebih dari 180

derajat. Generator stabil ditandai dengan grafik berwarna biru. Sedangkan generator tidak stabil ditandai dengan grafik berwarna merah.



**Gambar 4.1** Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Labuhan Angin dan Sibolga (2025 – *Peak Load*)

Pada tahun 2025 normal, *short circuit* 3 fasa dilakukan di saluran labuhan angin - sibolga . Generator yang akan diperhatikan yaitu PLTU Labuhan Angin. Kemudian satu saluran dari saluran ganda lepas. Dengan metode *time domain simulation* didapatkan waktu pemutusan kritisnya (*CCT*) antara (  $t = 0.696$  dan  $0.697$  detik). Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.2. Pada saat  $t = 0.696$  generator stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut kurang dari 180 derajat. Sedangkan pada saat  $t = 0.697$  generator tidak stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut lebih dari 180 derajat. Generator stabil ditandai dengan grafik berwarna biru. Sedangkan generator tidak stabil ditandai dengan grafik berwarna merah.

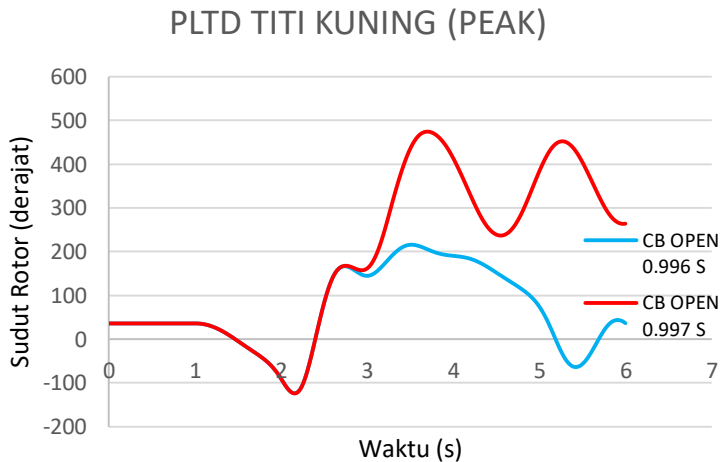


**Gambar 4.2** Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Labuhan Angin dan Sibolga (2025 – Normal Load)

Berdasarkan gambar hasil simulasi di atas pada tahun 2025 peak dan 2025 normal, CCT 2025 normal lebih besar. Yang artinya semakin kecil loadnya maka kecenderungan sistem akan lebih tahan terhadap gangguan.

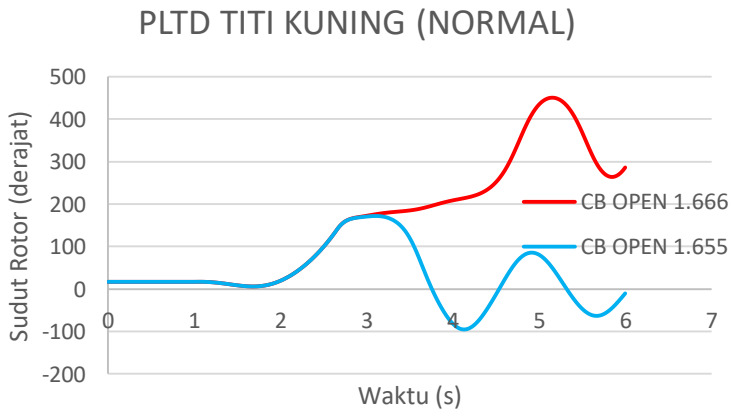
b) CCT Saluran Titi Kuning – Sei Rotan

Pada tahun 2025 beban puncak, *short circuit* 3 fasa dilakukan di saluran labuhan Titi Kuning – Sei Rotan . Generator yang akan diperhatikan yaitu PLTD Titi Kuning. Kemudian satu saluran dari saluran ganda lepas. Dengan metode *time domain simulation* didapatkan waktu pemutusan kritisnya (*CCT*) antara (  $t = 0.996$  dan  $0.997$  detik). Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.3. Pada saat  $t = 0.996$  generator stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut kurang dari 180 derajat. Sedangkan pada saat  $t = 0.997$  generator tidak stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut lebih dari 180 derajat. Generator stabil ditandai dengan grafik berwarna biru. Sedangkan generator tidak stabil ditandai dengan grafik berwarna merah.



**Gambar 4.3** Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Titi Kuning dan Sei Rotan (2025 – *Peak Load*)

Pada tahun 2025 normal, *short circuit* 3 fasa dilakukan di saluran Titi Kuning - Sei Rotan. Generator yang akan diperhatikan yaitu PLTD Titi Kuning. Kemudian satu saluran dari saluran ganda lepas. Dengan metode *time domain simulation* didapatkan waktu pemutusan kritisnya (*CCT*) antara ( $t = 0.53$  dan  $0.531$  detik). Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.4. Pada saat  $t = 0.53$  generator stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut kurang dari 180 derajat. Sedangkan pada saat  $t = 0.531$  generator tidak stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut lebih dari 180 derajat. Generator stabil ditandai dengan grafik berwarna biru. Sedangkan generator tidak stabil ditandai dengan grafik berwarna merah.



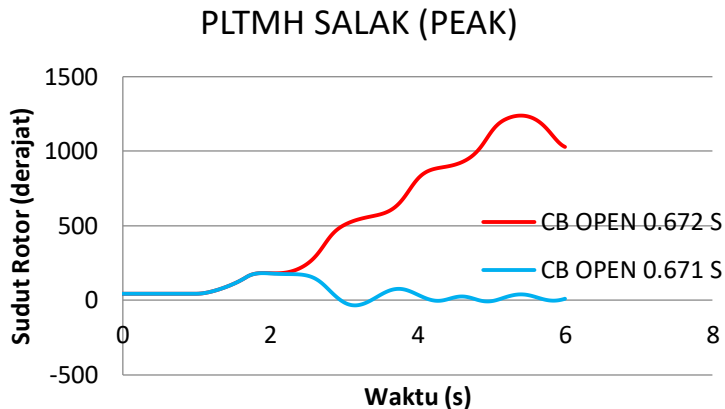
**Gambar 4.4** Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Titi Kuning dan Sei Rotan (2025 – *Normal Load*)

Berdasarkan gambar hasil simulasi di atas, pada tahun 2025 peak dan 2025 normal, CCT 2025 normal lebih besar. Yang artinya semakin kecil loadnya maka kecenderungan sistem akan lebih tahan terhadap gangguan. Terlihat jelas pada perubahan sudut rotor generator PLTD Titi Kuning.

c) CCT Saluran Salak – Sidikalang

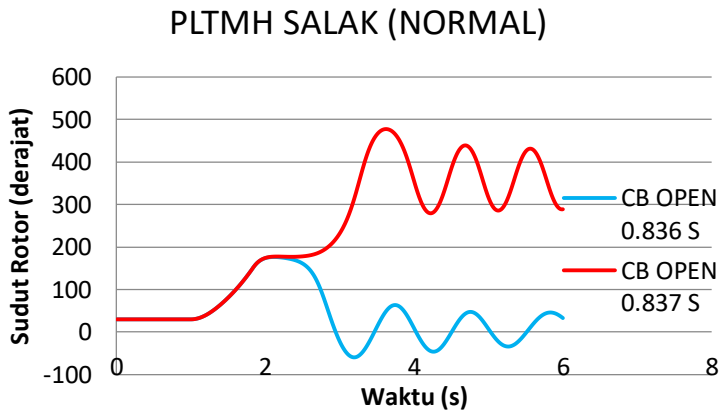
Pada tahun 2025 beban puncak, *short circuit* 3 fasa dilakukan di saluran labuhan Salak – Sidikalang. Generator yang akan diperhatikan yaitu PLTMH Salak. Kemudian satu saluran dari saluran ganda lepas. Dengan metode *time domain simulation* didapatkan waktu pemutusan kritisnya (*CCT*) antara ( $t = 0.671$  dan  $0.672$  detik). Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.5. Pada saat  $t = 0.671$  generator stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut kurang dari 180 derajat. Sedangkan pada saat  $t = 0.672$  generator tidak stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut lebih dari 180 derajat. Generator stabil ditandai dengan grafik berwarna biru.

Sedangkan generator tidak stabil ditandai dengan grafik berwarna merah.



**Gambar 4.5** Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Salak dan Sidikalang (2025 – *Peak Load*)

Pada tahun 2025 normal, *short circuit* 3 fasa dilakukan di saluran Salak – Sidikalang. Generator yang akan diperhatikan yaitu PLTMH Salak. Kemudian satu saluran dari saluran ganda lepas. Dengan metode *time domain simulation* didapatkan waktu pemutusan kritisnya (*CCT*) antara (  $t = 0.836$  dan  $0.837$  detik). Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.6. Pada saat  $t = 0.836$  generator stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut kurang dari 180 derajat. Sedangkan pada saat  $t = 0.837$  generator tidak stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut lebih dari 180 derajat. Generator stabil ditandai dengan grafik berwarna biru. Sedangkan generator tidak stabil ditandai dengan grafik berwarna merah.



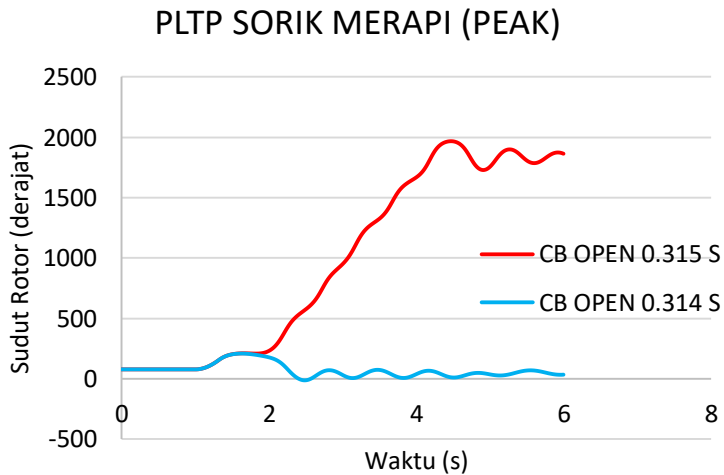
**Gambar 4.6** Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Salak – Sidikalang (2025 – Normal Load)

Berdasarkan gambar 4.6, pada tahun 2025 peak dan 2025 normal, CCT 2025 normal lebih besar. Yang artinya semakin kecil loadnya maka kecenderungan sistem akan lebih tahan terhadap gangguan. Terlihat jelas pada perubahan sudut rotor generator Salak.

d) CCT Saluran Sorik Merapi – Penyabungan

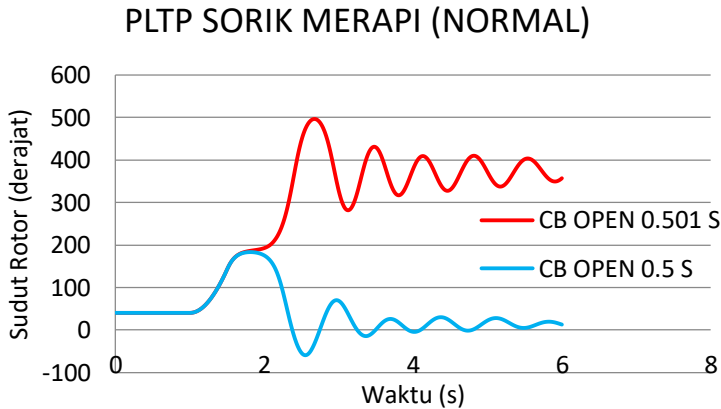
Pada tahun 2025 beban puncak, *short circuit* 3 fasa dilakukan di saluran Sorik Merapi – Penyabungan. Generator yang akan diperhatikan yaitu PLTP Sorik Merapi. Kemudian satu saluran dari saluran ganda lepas. Dengan metode *time domain simulation* didapatkan waktu pemutusan kritisnya (CCT) antara (  $t = 0.314$  dan  $0.315$  detik). Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.7. Pada saat  $t = 0.314$  generator stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut kurang dari 180 derajat. Sedangkan pada saat  $t = 0.315$  generator tidak stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut lebih dari 180 derajat. Generator stabil ditandai dengan grafik berwarna biru. Sedangkan generator tidak stabil ditandai dengan grafik berwarna merah.





**Gambar 4.7** Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Sorik Merapi dan Penyabungan (2025 - *peak load*)

Pada tahun 2025 normal, *short circuit* 3 fasa dilakukan di saluran Sorik Merapi – Penyabungan. Generator yang akan diperhatikan yaitu PLTP Sorik Merapi. Kemudian satu saluran dari saluran ganda lepas. Dengan metode *time domain simulation* didapatkan waktu pemutusan kritisnya (*CCT*) antara ( $t = 0.5$  dan  $0.501$  detik). Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.8. Pada saat  $t = 0.5$  generator stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut kurang dari 180 derajat. Sedangkan pada saat  $t = 0.501$  generator tidak stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut lebih dari 180 derajat. Generator stabil ditandai dengan grafik berwarna biru. Sedangkan generator tidak stabil ditandai dengan grafik berwarna merah.



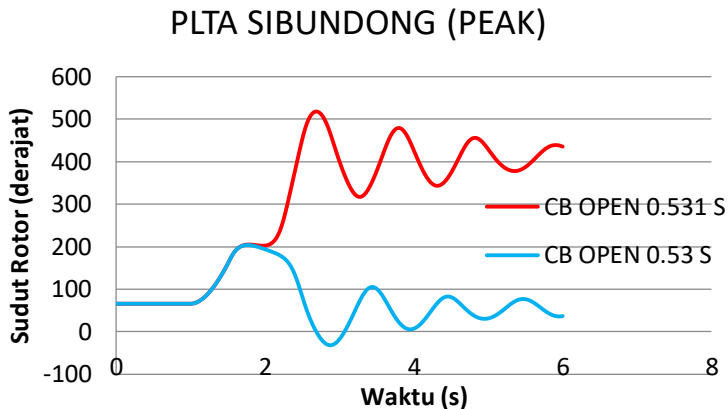
**Gambar 4.8** Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Sorik Merapi dan Penyabungan (2025 – *Normal Load*)

Berdasarkan gambar hasil simulasi di atas, pada tahun 2025 peak dan 2025 normal, CCT 2025 normal lebih besar. Yang artinya semakin kecil loadnya maka kecenderungan sistem akan lebih tahan terhadap gangguan. Terlihat jelas pada perubahan sudut rotor generator Sibundong.

e) CCT Saluran Sigundong – Tarutung

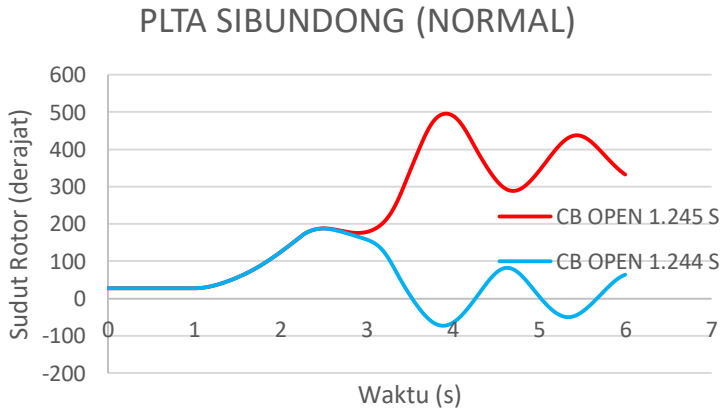
Pada tahun 2025 beban puncak, *short circuit* 3 fasa dilakukan di saluran Sibundong dan Tarutung. Generator yang akan diperhatikan yaitu PLTA Sibundong. Kemudian satu saluran dari saluran ganda lepas. Dengan metode *time domain simulation* didapatkan waktu pemutusan kritisnya (*CCT*) antara ( $t = 0.53$  dan  $0.531$  detik). Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.5. Pada saat  $t = 0.53$  generator stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut kurang dari 180 derajat. Sedangkan pada saat  $t = 0.531$  generator tidak stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut lebih dari 180 derajat. Generator stabil ditandai dengan grafik berwarna biru.

Sedangkan generator tidak stabil ditandai dengan grafik berwarna merah.



**Gambar 4.9** Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Sibundong dan Tarutung (2025 – *Peak Load*)

Pada tahun 2025 normal, *short circuit* 3 fasa dilakukan di saluran Sibundong dan Tarutung. Generator yang akan diperhatikan yaitu PLTA Sibundong. Kemudian satu saluran dari saluran ganda lepas. Dengan metode *time domain simulation* didapatkan waktu pemutusan kritisnya (*CCT*) antara ( $t = 1.244$  dan  $1.245$  detik). Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.6. Pada saat  $t = 1.244$  generator stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut kurang dari 180 derajat. Sedangkan pada saat  $t = 1.245$  generator tidak stabil karena hingga akhir simulasi sudut rotor berada pada sudut lebih dari 180 derajat. Generator stabil ditandai dengan grafik berwarna biru. Sedangkan generator tidak stabil ditandai dengan grafik berwarna merah.



**Gambar 4.6** Respon Sudut Rotor di Generator ketika Terjadi Gangguan 3 Fasa di Saluran antara Bus Sibundong dan Tarutung (2025 – Normal Load)

Berdasarkan gambar hasil simulasi di atas, pada tahun 2025 peak dan 2025 normal, CCT 2025 normal lebih besar. Yang artinya semakin kecil loadnya maka kecenderungan sistem akan lebih tahan terhadap gangguan. Terlihat jelas pada perubahan sudut rotor generator Sibundong.

#### 4.4 Hasil Critical Clearing Time

Dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation*, dilakukan beberapa pencarian waktu pemutusan kritis (Critical Clearing Time) yaitu waktu antara sistem stabil dan sistem waktu tidak stabil. Waktu stabil merupakan waktu pemutusan saluran dimana sistem kembali kekeadaan semulanya atau stabil. Sedangkan waktu tidak stabil merupakan waktu pemutusan saluran dimana sistem melebihi batas kestabilan dalam waktu yang tidak dapat diketahui. Simulasi dicoba pada beberapa saluran yang menuju dengan pembangkit didapatkan hasil seperti pada tabel 4.2

**Tabel 4.1** Hasil CCT saluran menuju pembangkit

Saluran		Normal		Peak		Generator Kritis	CCT
Dari	Ke	Stabil	Tidak Stabil	Stabil	Tidak Stabil		
Labuhan Angin	Sibolga	0.696	0.697	0.368	0.369	PLTU L. Angin	0.368
Asahan 3	Simangkok	0.734	0.735	0.44	0.441	PLTA Asahan 3	0.44
PLTGU Belawan	Sei Rotan	0.599	0.6	0.545	0.546	PLTGU Belawan	0.545
PLTGU Belawan	Binjai	0.661	0.662	0.538	0.539	PLTGU Belawan	0.538
PLTU Belawan	Paya Pasir	0.612	0.613	0.514	0.515	PLTU Sumut 1	0.514
Hasang	Aek Kanopan	0.893	0.894	0.766	0.767	PLTA Hasang	0.766
Tanah Jawa	P. Siantar	1.11	1.111	0.726	0.727	PLTMH T. Jawa	0.726
Titik Kuning	Sei Rotan	1.655	1.656	0.996	0.997	PLTD T. Kuning	0.996
Pakkat	Dolak Sanggul	1.165	1.166	0.956	0.957	PLTMH Pakkat	0.956
Parlilitan	Dolak Sanggul	0.898	0.899	0.615	0.616	PLTMH Parlilitan	0.615
Sorik Merapi	Panyabungan	0.5	0.501	0.314	0.315	PLTP S. Merapi	0.314
Salak	Sidikalang	0.836	0.837	0.671	0.672	PLTMH Salak	0.671
Sibundong	Tarutung	1.244	1.245	0.53	0.531	PLTA Sibundong	0.53
Sipan	Sibolga	1.243	1.244	0.475	0.476	PLTA Sipan	0.475
Sumbagut 3, 4	Galang	0.532	0.533	0.356	0.357	PLTGU Sumabgut 3, 4	0.356
Sumbagut 1	Percut	-	-	0.635	0.636	PLTA B. Toru	0.635
Sumut 2	Perdagangan	0.563	0.564	0.327	0.328	PLTU Sumut 2	0.327
Batang Toru	Sarulla	-	-	0.596	0.597	PLTA B. Toru	0.596
Wampu	Brastagi	0.866	0.867	0.692	0.693	PLTA Wampu	0.692

Setelah CCT pada saluran menuju pembangkit didapatkan, kemudian bandingkan CCT tersebut dengan setting CB yang sudah ada. Apabila setting CB lebih besar dari CCT yang didapatkan, maka saluran ini harus diwaspadai. Sebaliknya jika setting CB lebih kecil dari CCT, maka generator aman.

Sebagai contoh pada saluran PLTGU Belawan – Sei Rotan, CCT = 0.545 s. Dan setting CB adalah 0.3 s. CCT saluran lebih besar dari setting CB. Sehingga, setelah terjadi gangguan pada saluran ini, maka generator PLTGU Belawan akan tetap aman.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 KESIMPULAN**

Dari hasil simulasi dan analisis, maka dalam Tugas Akhir ini dapat ditarik kesimpulan bahwa:

- Critical Clearing Time yang paling buruk terjadi di SC antara saluran antara Sorik Merapi – Panyabungan terlihat dari hasil simulasi respon sudut rotor generator menjadi tidak stabil pada selang waktu yang cepat yaitu 0,315 s pada beban peak dan 0.501 pada beban normal
- Critical Clearing Time yang paling baik terjadi di SC saluran antara Titi Kuning – Sei Rotan terlihat dari hasil simulasi respon sudut rotor generator menjadi tidak stabil pada selang waktu yang lama yaitu 0,997 s pada beban peak dan 1.656 pada beban normal
- Dari beberapa titik gangguan yang di simulasikan di sistem sumatera utara 150kV terdapat Critical Clearing Time yang tidak ditemukan, yang berarti sistem tetap stabil sampai dengan selang waktu pembukaan cb 5 s.

#### **5.2 SARAN**

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan setelah melakukan analisa adalah sebagai berikut :

- Untuk mencegah generator rusak maka perlu dilakukan pula analisa frekuensi dari bus yang tersambung ke generator
- Untuk memperbaiki kestabilan dapat dilakukan penambahan SVC pada sistem kelistrikan Sumatera Utara

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## DAFTAR PUSTAKA

1. S. Atmaja, A. Priyadi, and T. Yuwono, "Perhitungan Critical Clearing Time dengan Menggunakan Metode Time Domain Simulation," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2012
2. Kundur, P., "*Power System Stability and Control*", McGraw-Hill, Inc, 1994.
3. Stevenson, W.D., Jr and John J. Grenger, "*Elements of Power System Analysis, 4th Edition*". McGraw-Hill, Inc, 1994
4. IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, "*Definition and Classification of Power System Stability*" IEEE Transactions on Power system , vol. 19, no. 2, may 2004.
5. Azizah, Nurul," *Analisis stabilitas transien pada sistem kelistrikan larantuka (NTT) akibat penambahan PLTU 2x4 M W tahun 2013*". Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2010.
6. Aqilah, Nur, " Power System Stability Analysis using Matlab ", Faculty of Electric and Electroic Engineering, Uiversiti Tun Hussein Onn Malaysia, 2010
7. Tridianto, Erick, " *Analisis stabilitas transien pada PT. Petrokimia gresik akibat penambahan pembangkit 20&30 MW serta penambahan pabrik fosforit acid dan amonium urea*", Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2010

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

51

## RIWAYAT HIDUP



**Nur Ichsan Boni.** dilahirkan di kota Jakarta, 31 Desember 1994. Penulis memulai jenjang pendidikannya di MI Miftahul Jannah hingga lulus tahun 2006. Setelah itu penulis melanjutkan studinya di SMP Negeri 203 Jakarta dan lulus tahun 2009, penulis diterima sebagai murid SMA Negeri 98 Jakarta hingga lulus tahun 2012. Pada tahun yang sama penulis masuk ke Jurusan D3 Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada hingga lulus tahun 2015. Kemudian

penulis melanjutkan studi Program Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya lewat program Lintas Jalur mengambil jurusan Teknik Elektro dan bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi dia alamat email [ichsan.boni@gmail.com](mailto:ichsan.boni@gmail.com).

*Halaman ini sengaja dikosongkan*